

Методика проведения работ в скважинной сейсморазведке

■ Шехтман Г. А., ООО «Геофизические системы данных», г. Москва

Введение

Современная скважинная сейсморазведка является многоволновым методом, поскольку проводится она, как правило, трёхкомпонентными зондами. Аббревиатура ВСП (вертикальное сейсмическое профилирование), используемая здесь для краткости и как устоявшееся понятие, не вполне отображает множество модификаций скважинной сейсморазведки, предложенных к настоящему времени. Эта оговорка существенна, так как к настоящему времени к методу ВСП в нашей стране и за рубежом принято относить уровневые наблюдения, при которых зонд находится на фиксированной глубине, а источник колебаний перемещают вдоль земной поверхности (walkaway VSP, walkaround VSP, massive VSP), и даже наблюдения в горизонтальных скважинах. Для этих модификаций скорее бы подошло название *горизонтальное скважинное сейсмическое профилирование*.

Методика работ ВСП непосредственно привязана к методическим, геологическим и технологическим задачам, решаемым этим методом [Гальперин, 1994]. К ключевым вопросам методики, рассматриваемым ниже, относят выбор условий возбуждения колебаний и системы наблюдений.

Условия возбуждения колебаний

Выбор условий возбуждения определяется тем, какие источники колебаний доступны для проведения работ – наземные или погружные. В каждом конкретном случае предпочтение отдают тому источнику, который оказывается наиболее эффективным, т.е. в конкретных сейсмогеологических условиях обеспечивает приемлемое качество записей при наименьших затратах. Для проведе-

ния ВСП используют те же источники колебаний, что и в позиционной (наземной и морской) сейсморазведке.

Одним из условий получения записей ВСП высокого качества является постоянство условий возбуждения. Необходимость многократного возбуждения колебаний для отработки скважины малоканальными зондами заставляет отдавать предпочтение невзрывным импульсным и вибрационным источникам, обладающим наибольшей стабильностью. Требование высокой надежности вытекает из того, что при отработке скважины малоканальными зондами при достаточно малом шаге наблюдений приходится за короткое время осуществлять множество воздействий, количество которых достигает сотен.

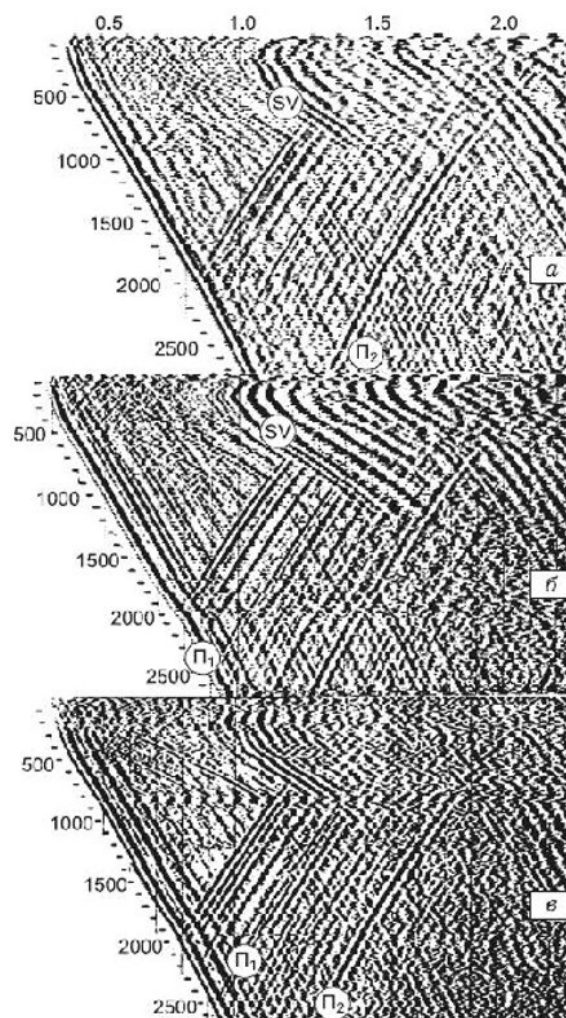
Мобильность невзрывных поверхностных источников позволяет эффективно использовать их в тех модификациях метода ВСП, которые требуют оперативного изменения местоположения ПВ при отработке скважин. Виброисточник наилучшим образом удовлетворяет таким важным для метода ВСП характеристикам, как надежность и повторяемость [Жуков и др., 2011].

Еще одно важное требование к источнику колебаний в методе ВСП – это достаточно широкий диапазон частот возбуждаемых колебаний. В методе ВСП одной из главнейших методических задач является изучение условий выделения волн, отраженных от всех сейсмических границ, представляющих геологический интерес. Ясно, что спектры различных отражений могут сильно различаться между собой. Более того, отражения от одного и того же объекта, полученные на различных типах волн, могут существенно различаться. Поэтому полоса частот,

излучаемых в среду при проведении работ методом ВСП, должна определяться лишь техническими возможностями используемых источников и быть максимально расширенной как в область низких, так и в область высоких частот. К этому следует добавить и тот очевидный факт, что, независимо от спектров конкретных отражений, расширение полосы возбуждаемых частот позволяет наиболее эффективно применять фильтры сжатия на этапе обработки. Сопоставление различных источников между собой позволяет оценить сейсмическую эффективность каждого из них в конкретных сейсмогеологических условиях.

На рис. 1 приведен пример сейсмограмм ВСП, полученных при возбуждении колебаний взрывами в мелких скважинах, импульсным газодинамическим источником ГСК-6 и виброисточником СВ-5-150. На участке Жанажол (Казахстан) все три источника позволили получить сопоставимые между собой записи с достаточно высокой повторяемостью формы сигнала и глубиной исследования. Целевые отражения П1 и П2, соответствующие ниже- и подсолевым отложениям, выделяются одинаково уверенно. Видно, однако, что сейсмограмма ВСП, полученная с взрывным источником, отличается более коротким импульсом прямой волны и большей разрешенностью последующей записи.

При выборе глубины погружного источника учитывают, прежде всего, положение акустически наиболее резкой границы. Ею может быть подошва зоны малых скоростей (ЗМС), а также дневная или морская поверхность. Волна-спутник, отраженная от такой границы, в наибольшей степени влияет на форму суммарного сигнала и его спектр. Сильное влияние самой верхней части разреза и глубины источника на прямую волну



▲ Рис. 1. Сопоставление сейсмограмм ВСП при возбуждении колебаний взрывами в мелких скважинах (а), источником ГСК-6 (б) и виброисточником СВ-5-150 (в). Месторождение Жанажол (Казахстан).

можно использовать для управления спектральным составом возбуждаемых колебаний. Ясно, что от спектрального состава возбуждаемых колебаний зависит не только спектральный состав продольных волн, но и обменных волн различного типа, используемых в МВС.

В случае простого строения ЗМС частотную характеристику $H(f)$ интерференционной системы (прямая волна плюс спутник) можно легко рассчитать, зная глубину источника, глубину подошвы ЗМС и коэффициент отражения K :

$$H(f) = \sqrt{1 + K^2 - 2K \cos(2\pi f\tau)}$$

где $\tau = 2h/V$, h – глубина источника под акустически наиболее резкой границей, V – скорость в среде, в которой расположен источник колебаний.

Из этой формулы видно, что $H(f)$ имеет периодический характер, колеблясь между значениями $(1+K)$ и $(1-K)$. Первый максимум $H(f)$ соответствует $f_{max} = V/4h$. Для частот $f < f_{max}$ частотная характеристика $H(f)$ напоминает фильтр высоких частот, воздействие которого на спектр импульса прямой волны приводит к обогащению его высокими частотами, если f_{max} расположен в правой части

рабочего диапазона частот.

На рис. 2 в качестве примера приведены суммарные импульсы, зарегистрированные зондом в глубокой скважине, а также их спектры (Московская синеклиза). Видно, что в интервале глубин 21–23 м происходит скачкообразное изменение частоты максимума спектра суммарного сигнала, обусловленное взаимодействием второго минимума $H(f)$ и максимума спектра прямой волны: на глубине $h=21$ м частота максимума составляет 34 Гц, а при $h=23$ м – 63 Гц. В интервале глубин 8–20 м она постепенно уменьша-

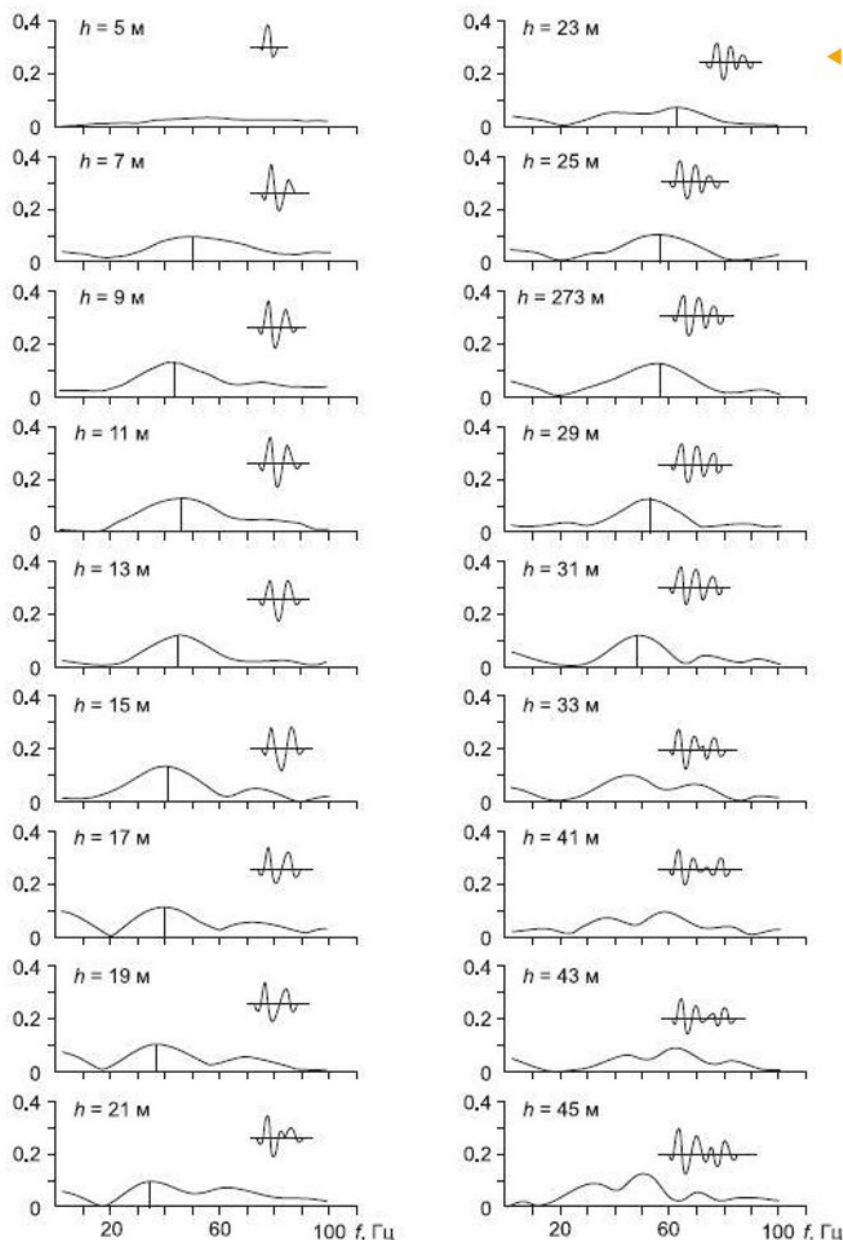


Рис. 2. Амплитудные спектры импульсов (прямая волна + спутник) при разной глубине взрыва.

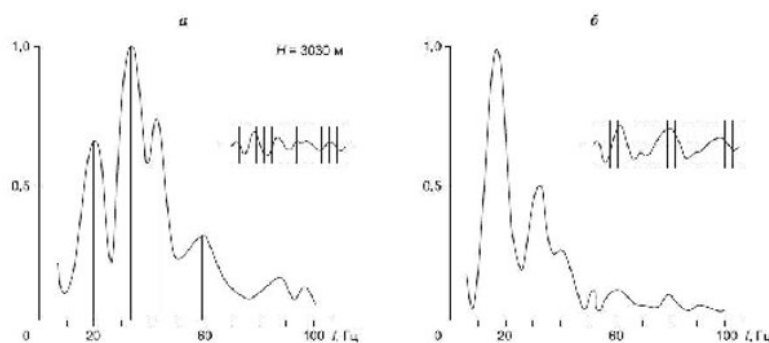


Рис. 3. Форма и спектры импульсов, возбуждаемых при взрывах в мелких скважинах. Вынос ПВ 200 м, глубина приема 3030 м, взрывы зарядов тротила весом 0.4 кг на глубине 16 м (Белоруссия); а – при взрывах из вновь пробуренной скважины, б – после многократных взрывов в одной и той же скважине.

ется в среднем на 10 Гц (от 45 до 35 Гц). Ширина основного максимума спектра (на уровне 0.7) уменьшается с глубиной постепенно, в среднем на 5 Гц в интервале глубин 8-30 м. Сопоставление теоретически рассчитанных и экспериментальных значений максимума и ширины спектра убедительно показало, что на спектры суммарных импульсов в аналогичных условиях основное влияние оказывает волна-спутник.

Если глубину источника колебаний под акустически наиболее резкой границей выбрать такой, чтобы f_{max} совпадала с максимальной частотой рабочего диапа-

зона сейсморегирующей аппаратуры, то это приведет к максимальному расширению спектра возбуждаемых колебаний вправо, в область высоких частот.

Постоянная глубина источника колебаний далеко не всегда обеспечивает стабильность возбуждаемого импульса. При фиксированной глубине приёма после ряда воздействий можно иногда наблюдать низкочастотные «хвосты», сопоставимые по интенсивности с основным импульсом (рис. 3). Природа таких «спутников» не вполне ясна, но связаны они предположительно с изменением упругих свойств среды, непосредственно окружающей источник, под влиянием многократных на неё воздействий.

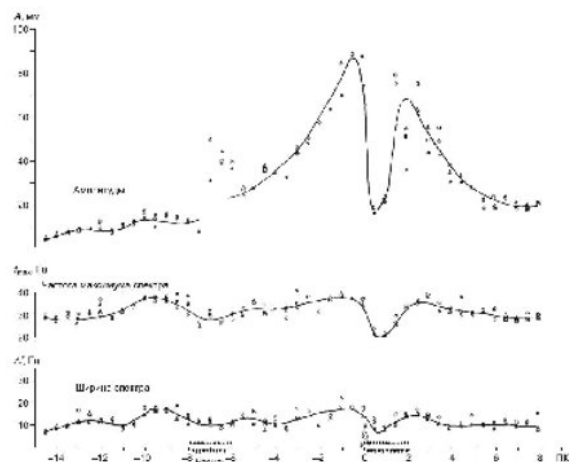


Рис. 4. Амплитуды (сверху) и параметры спектра импульса прямой волны с различных ПВ. Источник – ГСК-10, глубина приема 1100-1200 м (Белоруссия). Справа от скважины показана дорога через болото. Болотистый участок характеризуется аномальным уменьшением амплитуды и частоты максимума спектра.

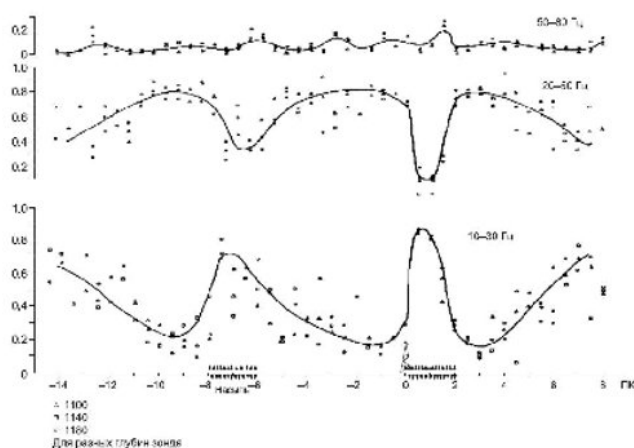
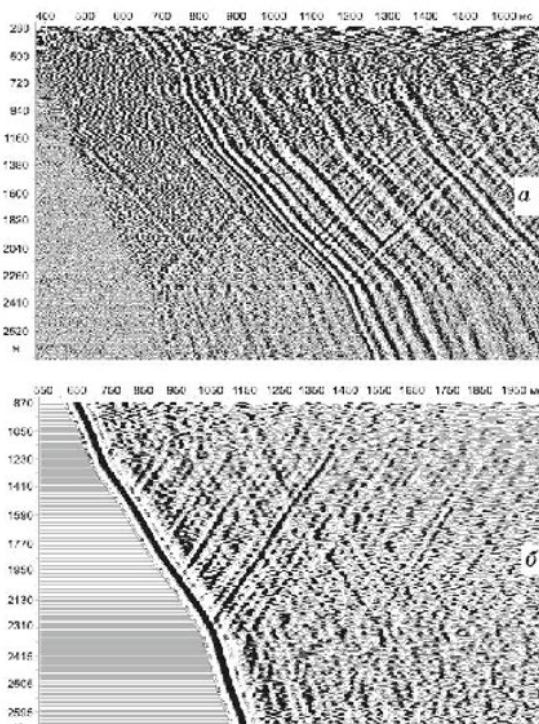


Рис. 5. Относительная интенсивность (снизу вверх) низко-, средне- и высокочастотных частей спектра импульсов прямой волны с различных ПВ. Источник – ГСК-10, глубина приёма 1100-1200 м (Белоруссия).

На спектральный состав колебаний, возбуждаемых поверхностными источниками, сильное влияние оказывают механические свойства грунта, через который передаются усилия от источника в среду. Регистрация колебаний внутри среды позволяет отчётливо это увидеть. В качестве примера на рис. 4-5 приведены амплитуда и параметры спектра прямой волны, зарегистрированной в скважине. Невзрывной импульсный источник перемещался по насыпной дороге, проложенной по частично заболоченной местности. Видно, как в пределах заболоченных участков резко падает интенсивность возбуждаемых колебаний, при этом частота максимума перемещается в низкочастотный диапазон, а ширина спектра уменьшается. Неучет подобных эффектов в наземной сейсморазведке приводит подчас к тому, что их приписывают изменению свойств отражающих границ.



▲ Рис. 6. Сейсмограмма ВСП на у-компоненте; а – исходная запись, б – после деконволюции по цугу падающих поперечных волн. Восточная Сибирь.

Системы наблюдений в методе ВСП

В зависимости от степени сложности решаемых задач и исследуемой геологической среды применяют одномерные, двумерные, трёхмерные и площадные системы наблюдений.

Источники колебаний могут быть направленными или ненаправленными. К настоящему времени накопилось достаточно много примеров того, как в районах с различными сейсмогеологическими условиями при возбуждении колебаний ненаправленными или невзрывными источниками с вертикальной направленностью регистрируются регулярные волны на «побочной» у-компоненте (рис. 6).

Шаг наблюдений по стволу скважины. При проведении работ любыми модификациями метода ВСП шаг между соседними точками наблюдения ΔZ выбирают из условия:

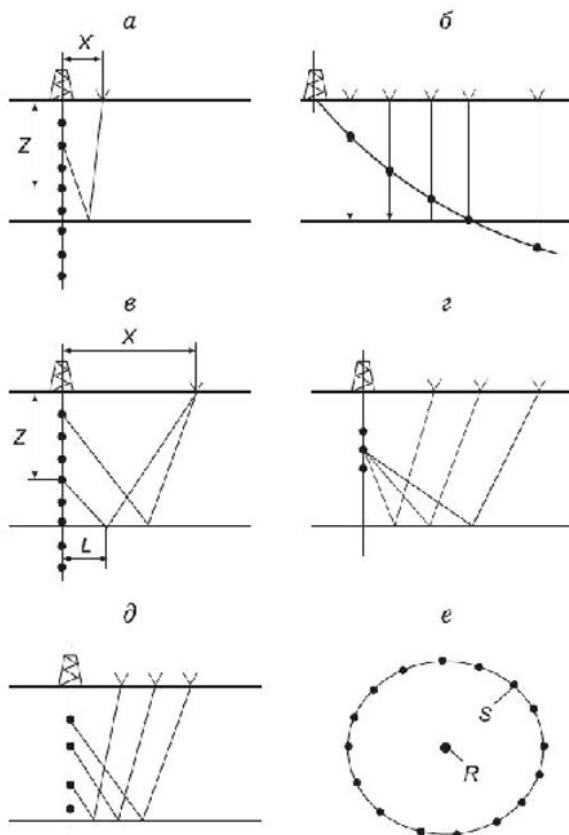
$$\Delta Z \leq V_{\min} / (2f_{\max}),$$

где $V_{\min}$ – минимальная пластовая скорость распространения поперечных волн в пределах покрывающей толщи разреза, пересеченной скважиной; $f_{\max}$ – правая граничная частота рабочего диапазона частот (максимальная частота в спектре возбуждаемого сигнала).

Из этой формулы следует, что при регистрации обменных PS-волн, спектры которых близки к спектрам продольных волн, шаг наблюдений по стволу скважины должен быть вдвое меньшим по сравнению с шагом на продольных волнах. В противном случае на этапе обработки записей при разделении волн можно столкнуться с искажающим влиянием аляйсинг-эффекта.

Модификации скважинной сейсморазведки, их преимущества и недостатки

Системы наблюдений, соответствующие основным модификациям метода ВСП, схематически изображены на рис. 7.



▲ Рис. 7. Основные модификации метода ВСП
а, б – продольное ВСП в вертикальной и наклонной скважинах ($X < Z$); в – не продольное ВСП (НВСП); г – уровневое ВСП (МОГ); д – ВСП с подвижным источником (ВСП-ПИ); е – круговое уровневое ВСП (R – проекция сейсмоприемника на земную поверхность, S – источник колебаний).

Описываемые ниже модификации в нашей стране и за рубежом получили определённые, не вполне совпадающие при переводе с одного языка на другой, названия.

Продольное ВСП (zero-offset VSP) является стандартной модификацией метода, проводящейся практически во всех скважинах, обрабатываемых методом ВСП. Название этой модификации определяется тем, что в ней удалением ПВ от скважины можно пренебречь по сравнению с глубиной зонда (рис. 7, а). Применяется для определения средних, пластовых и интервальных сейсмических скоростей, для изучения волнового поля

и стратиграфической привязки волн, изучения их затухания, для расчёта операторов фильтра при деконволюции записей наземной сейсморазведки и ВСП, а также для опережающего прогноза акустической жесткости отложений ниже забоя скважины.

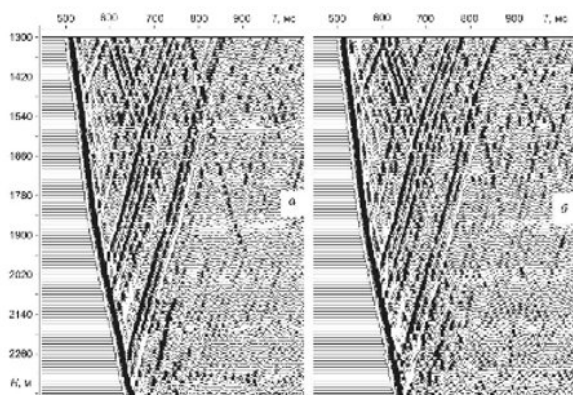
ВСП в наклонных скважинах (deviated-well VSP) проводят на вертикальных (центральных) лучах, перемещая источник колебаний вдоль земной поверхности, а зонд – вдоль ствола скважины таким образом, чтобы они всегда находились на вертикальной линии (рис. 7, б). Эту модификацию по существу относят к продольному ВСП, так как удаление источника от проекции точки приема на земную поверхность имеет здесь тот же смысл, что и удаление ПВ от устья вертикальной скважины. Применяется для решения большинства задач, указанных выше для продольного ВСП в вертикальных скважинах. Кроме того, с успехом применяется для изучения околоскважинного пространства при помощи разрезов, протяженность которых в плане близка к длине проекции ствола скважины на земную поверхность. Такие разрезы, элементарно получающиеся из исходных записей, отличаются высокой разрешенностью и достоверностью.

Профильные модификации метода ВСП

Основное назначение профильных модификаций ВСП – изучение структуры околоскважинного пространства. Результатом обработки при этом являются глубинные или временные разрезы, а также значения сейсмических параметров, полученных в результате решения обратной задачи.

В настоящее время применяют три профильные модификации – не продольное ВСП (НВСП), уровневое ВСП, а также ВСП с подвижным источником колебаний (ВСП-ПИ).

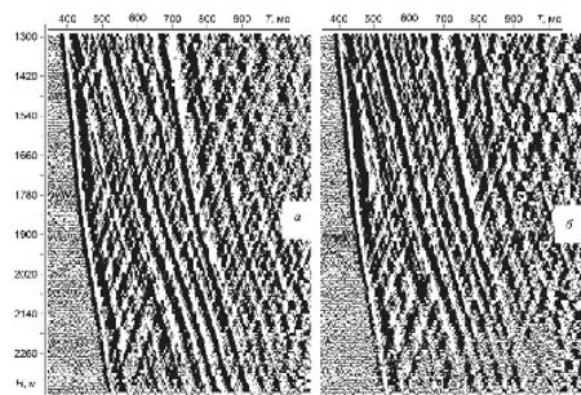
Непродольное ВСП (offset VSP) – модификация, в которой удалением ПВ от скважины нельзя пренебречь по сравнению с глубиной точки приема, перемещающейся в процессе отработки скважины (рис. 7, в). НВСП широко используют при решении структурных, параметрических и литолого-стратиграфических задач, изучении анизотропии скоростей и выделении трещинных коллекторов по поляризации волн. При изучении коллекторов трещинного типа по меньшей мере три ПВ размещают в различных азимутах [Шехтман, Кузнецов, Ефимов и др., 2004]. Проведение НВСП с разноудалённых ПВ (multioffset VSP) в условиях наклонно-слоистых сред позволяет количественно оценить параметры анизотропии и успешно использовать их при формировании изображений среды [Grech et al., 2002]. В условиях искривленных скважин проведение НВСП с пунктов возбуждения, расположенных симметрично относительно проекции ствола скважины на земную поверхность с использованием продольных и обменных волн позволяет успешно изучать трещиноватые анизотропные зоны в карбонатах [Liu et al., 2006].



▲ Рис. 8. Сейсмограммы ВСП-ПИ после ввода статики и деконволюции по цугу падающих волн; а – на запад от скважины, б – на восток. Z-компонента. Восточная Сибирь [Шехтман и др., 2009].

Уровневое ВСП (walkawayVSP). В этой модификации метода, больше известной раньше как метод обращенных годографов, или МОГ, положение зонда в скважине фиксировано, а ПВ перемещают вдоль горизонтальных профилей, пересекающих устье скважины или (в случае искривленной скважины) проекцию на земную поверхность фиксированного интервала скважины, содержащего точку приёма (рис. 7, г). Модификацию широко используют за рубежом в сочетании с НВСП при изучении параметров анизотропии скоростей и структуры околоскважинного пространства.

Круговое уровневое ВСП (walkaround VSP) – модификация метода ВСП, в которой источник колебаний перемещают вдоль круговой линии вокруг устья скважины или проекции точки приёма на дневную поверхность (в случае искривленных скважин) (рис. 7, е). Используют для изучения анизотропии и анализа расщепления поперечных волн в условиях трещиноватых зон. Довольно эффективным является использование круговых профилей при изучении анизотропии слоистых сред [Winterstein and De, 2001] и трещиноватых зон [Horne, 2003; Maultzsch et al., 2009; Wild, 2011].



▲ Рис. 9. Сейсмограммы ВСП-ПИ на х-компоненте после ввода статики; а – профиль на запад от скважины, б – на восток. Восточная Сибирь [Шехтман и др., 2009].

ВСП с подвижным источником колебаний (ВСП-ПИ) (moving source VSP). При ВСП-ПИ скважина отрабатывается при одновременном изменении местоположения зонда при его движении снизу вверх и местоположения ПВ при его перемещении от скважины (рис. 7, д). Эту модификацию метода применяют с целью локализации нефтеконтролирующих тектонических нарушений, детализации строения сложно построенных нефтеперспективных объектов, а также выяснения причин отсутствия нефти в скважине, расположенной рядом с фонтанировавшей скважиной [Шехтман, 1994].

Сейсмограмма ВСП-ПИ имеет вид, вполне привычный для пользователя методом ВСП. В нижней своей части она совпадает с сейсмограммой продольного ВСП, а в верхней части – с сейсмограммой НВСП (рис. 8). Обращает на себя внимание отчетливое разделение различных типов волн на различных компонентах: на z -компоненте прослеживаются восходящие продольные волны, а на x -компоненте – восходящие обменные волны типа PS (рис. 9).

ВСП-ПИ выполняют вдоль каждого из лучей (профилей пунктов возбуждения) за одну спуско-подъемную операцию. Для увеличения отношения сигнал/помеха можно применять многократное ВСП-ПИ, отрабатывая скважину повторно при различных начальных выносах ПВ. Наличие густой сети скважин, характерной для разведочного этапа, позволяет рассчитать встречную систему наблюдений таким образом, чтобы отдельные сейсмические разрезы ВСП можно было стыковать между собой в единый разрез, освещающий межскважинное пространство. Достигается это путем выбора соответствующих удалений ПВ от скважины.

Объективный анализ преимуществ и недостатков устоявшихся и вновь предложенных модификаций метода возможен лишь при количественной оценке параметров, общих для сопоставляемых модификаций. В качестве таких параметров правомерно использовать размер участка освещенности исследуемой границы отражёнными волнами (интервал границы, расположенный между крайними точками отражения), плотность расположения точек отражения (количество точек отражения, приходящееся на единицу длины участка освещенности), а также угол падения волны на отражающую границу [Шехтман, 1994]. Сопоставим между собой различные модификации по этим трём параметрам. Для ясности ограничимся плоской отражающей границей, разделяющей два полупространства.

Обозначим через φ угол падения отражающей границы, z - глубину точки приёма, H - глубину границы по вертикали, x - расстояние ПВ от устья скважины. Тогда удаление точки l точки отражения от начала координат составит следующую величину:

$$l = (H - z) \frac{x \cos 2\varphi \pm H \sin 2\varphi}{(2H - z) \cos \varphi \mp x \sin \varphi}$$

где верхний знак в дроби соответствует положению точки отражения по восстанию, а нижний – по падению.

По этой формуле, зная глубину верхней точки приема в скважине, можно рассчитать величину участка освещенности монотипными отраженными волнами границы, расположенной на глубине H . Для границ, расположенных ниже забоя скважины, наибольшую длину участок освещенности имеет при изучении околоскважинного пространства модификацией ВСП-ПИ. При изучении менее глубоких границ (пересечён-

ных скважиной) размеры участков освещённости для НВСП и ВСП-ПИ совпадают, превышая размер участка освещённости для МОГ. Исключением может быть случай, когда выше уровня регистрации колебаний при МОГ качество материала плохое, - тогда освещённость для трёх модификаций будет одинакова.

По мере увеличения глубины отражающей границы при НВСП все меньшая часть околоскважинного пространства, расположенная ниже забоя, освещается отражёнными волнами непосредственно вблизи от скважины, а участок освещённости, уменьшаясь, сдвигается в сторону от скважины. Модификация же ВСП-ПИ позволяет осветить максимальный размер глубоко залегающей исследуемой границы, резко сократив при этом время отработки скважины.

Для обменных отражённых волн с обменом на отражающей границе размер участка освещённости для всех модификаций метода ВСП существенно меньший, чем для монотипных волн (примерно в полтора раза). Его можно рассчитать точно путём трассирования лучей с учётом модели среды, пространственного положения ствола скважины и положения границы, на которой происходит обмен.

Плотность P распределения точек отражения (количество точек отражения, приходящееся на единицу длины отражающей границы) является важным параметром, определяющим устойчивость изображения среды при миграции записей ВСП, - чем выше P , тем изображение устойчивее.

При изменении глубины точки приема и (или) выноса источника колебаний от скважины точка отражения перемещается с определённой "скоростью". Чем эта "скорость" выше, тем реже вдоль отражающей границы располагаются точки

отражения, т.е. тем меньше плотность их распределения на соответствующем участке границы.

При малых углах падения наиболее равномерно распределены точки отражения при МОГ, однако при больших углах падения практически равномерную освещённость отражающей границы способна обеспечить лишь одна модификация метода – ВСП-ПИ. Существенно, что в непосредственной близости от скважины наибольшее значение P достигается при проведении ВСП-ПИ, а наименьшее – при НВСП. При значительных удалениях от скважины величина $P_{\text{ВСП-ПИ}}$ изменяется довольно плавно, поэтому устойчивость отображения отражающей границы на сейсмическом разрезе не изменяется сильно при прослеживании границы по латерали.

Если известно строение покрывающей толщи и геометрия изучаемой отражающей границы, то можно рассчитать систему наблюдений ВСП-ПИ таким образом, чтобы в пределах участков освещённости плотность распределения точек отражения была постоянна, а также обеспечить постоянство угла падения волны в каждую точку отражения. Выполнение этих условий позволяет свести к минимуму изменение интенсивности отражений от различных частей границы, обусловленное характером системы наблюдений, благодаря чему наиболее отчетливо проявляются аномальные эффекты, обусловленные изменением отражающих свойств в связи, например, с оконтуриванием залежи углеводородов. Методически такой подход не всегда может быть оправдан, т.к. он влечет за собой сокращение размера участка освещённости.

Максимальный угол падения волны на отражающую границу для модификации ВСП-ПИ является минимальным из

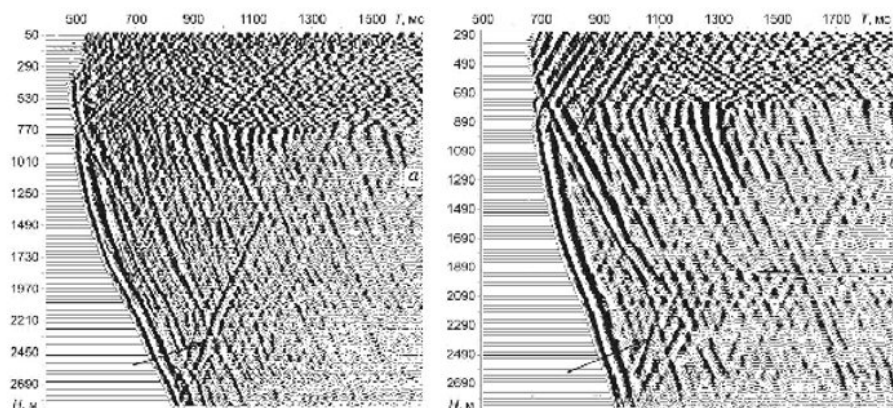


Рис. 10. Сопоставление сейсмограмм ВСП-ПИ (а) и НВСП (б), z-компонента. Стрелкой показано целевое отражение, более уверенно прослеживаемое при ВСП-ПИ.

трёх максимальных углов падения для рассматриваемых модификаций ВСП. Следствием этого являются минимальные искажения при ВСП-ПИ волнового поля, обусловленные преломлением луча, а также отражением от объекта.

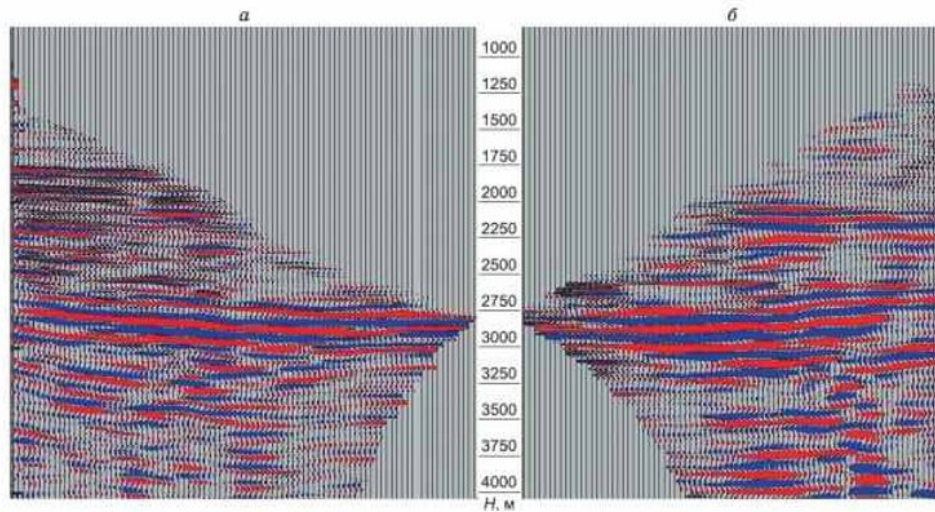
Рассмотренные особенности различных профильных модификаций метода ВСП и их сопоставление между собой приводят к выводу о ряде существенных преимуществ ВСП-ПИ, особенно при изучении глубокозалегающих объектов. Эта модификация позволяет обеспечить максимальный участок освещённости при минимальном угле падения волны на отражающую границу, при этом плотность распределения точек отражения максимальна вблизи скважины, что позволяет надёжно стыковать между собой сейсмические разрезы, полученные при расположении ПВ по разные стороны от скважины.

На рис. 10 приведены сейсмограммы НВСП и ВСП-ПИ, полученные на одном из сложно построенных участков Припятской впадины [Шехтман и др., 2013]. Различаются они существенно. Отражение от кровли ланского продуктивного горизонта (указано стрелкой) на сейсмограмме ВСП-ПИ характеризуется большей разрешённостью и регулярностью. Объясняется это, скорее всего, меньшим диапазоном изменений угла падения волны на отражающую границу, при этом сами углы падения меньше, поэтому

амплитуды отражений не изменяются столь резко, как при НВСП. Гораздо большие углы падения волны при НВСП приводят к формированию интенсивных обменных отражённых волн на z-компоненте, затрудняющих разделение волн. Более высокая разрешённость записей ВСП-ПИ обусловлена также и тем, что взрывы всякий раз при подъёме зонда возбуждались из новой скважины. Глубинные разрезы, полученные путём миграции отражённых продольных волн (рис. 11), так же различаются между собой: на разрезах ВСП-ПИ целевые границы более разрешены, выдержаны и допускают более уверенное выделение особенностей геологического разреза. На обменных отражённых волнах типа PS качество глубинных разрезов НВСП оказалось сопоставимым с качеством на продольных отражённых волнах (рис. 12).

НВСП имеет свои бесспорные преимущества перед другими модификациями метода ВСП при проведении работ в труднодоступных условиях, а также в случае запрета на прокладку профилей ПВ, необходимых для работ модификациями уровня ВСП и ВСП-ПИ, в таких, например, районах, как тундра. Кроме того, при обработке данных НВСП не требуется кропотливый учет статики, необходимый при обработке данных, полученных другими модификациями. Вместе с тем, следует отметить, что

► Рис. 11. Сопоставление глубинных разрезов на продольных отраженных волнах, полученных путем миграции записей ВСП-ПИ (а) и НВСП (б).



проблема учета статики в методе ВСП решается проще, чем в наземной сейсморазведке [Шехтман, Попов, 2007; Шехтман и др., 2009]. Более того, комбинирование наблюдений внутри среды одновременно с наземной объемной сейсморазведкой 3D позволяет нередко получить более надёжные данные о статике, используемые в наземной сейсморазведке.

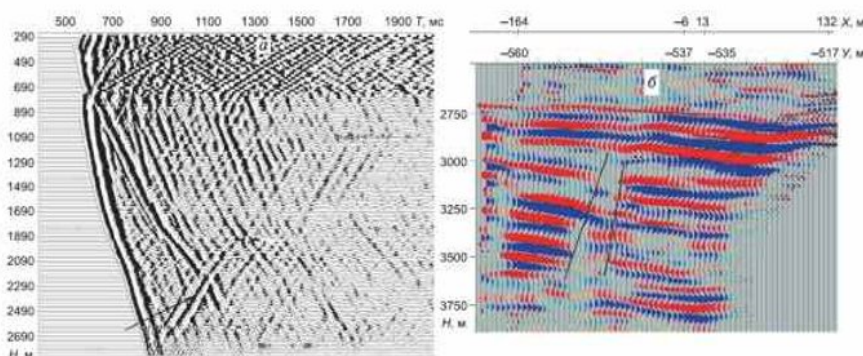
Трудно переоценить значимость математического моделирования при выборе модификаций метода ВСП и системы наблюдений. При проектировании работ, а также на этапе обработки и интерпретации лучевое и полноволновое моделирование может оказать существенную помощь [Шехтман, Кузнецов, Попов, 2004; Шехтман, Череповский, 2008].

Площадная модификация метода ВСП (3D-VSP, areal VSP, massive VSP)

В отличие от наземной сейсморазвед-

ки, любая модификация ВСП потенциально обладает более высокой пространственной разрешающей способностью, обусловленной приближением к изучаемому объекту и более высокой относительной интенсивностью высокочастотных компонент в рабочем диапазоне частот. Поэтому на объёмных изображениях, полученных при площадном ВСП на отражённых волнах, геологические объекты со сложной конфигурацией границ отображаются более отчётливо, что позволяет расширить класс экономических рентабельных ловушек углеводородов сложного строения, в том числе малоамплитудных и малоразмерных, а также ловушек неструктурного типа.

Равномерно осветить изучаемый объект отражёнными волнами позволяют лишь системы наблюдений, специально предназначенные для площадного ВСП. Эти системы вполне могут опираться на отмеченные выше закономер-



► Рис. 12. Сейсмограмма ВСП (а), х-компонента и глубинный разрез (б) на обменных отражённых волнах типа PS.

ности, присущие различным профильным модификациям ВСП. Поэтому в качестве основного прототипа площадным системам наблюдений ВСП было взято уровневое ВСП [Shekhtman et al., 1993; Шехтман, 1996; Zhang et al., 1996; Gulati et al., 2004].

Система наблюдений может быть реализована в виде параллельных между собой профилей, расстояние между которыми равно шагу между соседними ПВ, расположенными на каждом из профилей. Другой вариант – система концентрических кольцевых профилей, расположенных вокруг исследуемой скважины. Эту систему применяют на труднодоступных залесённых участках.

Литература

Гальперин Е.И. Вертикальное сейсмическое профилирование: опыт и результаты // М.: Наука, 1994. 320 с.

Жуков А.П., Колесов С.В., Шехтман Г.А., Шнеерсон М.Б. Сейсморастведка с вибрационными источниками. – Тверь, ООО «Издательство ГЕРС», 2011. – 412 с.

Шехтман Г.А. Методика ВСП, ее современное состояние и перспективы развития // Прикладная геофизика 1994. №131. С. 252-276.

Шехтман Г.А. Площадная модификация метода ВСП // Геофизика. 1996. № 1. С. 23-28.

Шехтман Г.А., Кузнецов В.М., Ефимов А.С., Кашук Е.П., Бандов В.П., Косолапов А.Ф., Сафиуллин Г.Г. Прогноз микро- и макроструктуры околоскважинного пространства в условиях Юрубчено-Тохомской зоны на основе комплексирования ВСП и пластовой инклинометрии // Технологии сейсморастведки, 2004. № 1. С. 14-18.

Шехтман Г.А., Попов В.В. Изучение структуры околоскважинного пространства по разностным и дифференциальным вертикальным годографам // Технологии сейсморастведки, 2007. № 3. С. 39-43.

Шехтман Г.А., Кузнецов В.М., Бодякин В.А., Дёка А.А. Изучение структуры околоскважин-

ного пространства комплексом модификаций метода ВСП в условиях Восточной Сибири // Технологии сейсморастведки. 2009. № 4. С. 73-82.

Шехтман Г.А., Кузнецов В.М., Попов В.В. Модификации метода ВСП: какую предпочесть // Технологии сейсморастведки. 2004. № 1. С. 75-79.

Шехтман Г.А., Кузнецов В.М., Громыко В.М. Изучение структуры околоскважинного пространства в Припятской впадине комплексом модификаций метода ВСП // Приборы и системы разведочной геофизики. 2013. № 1. С. 83-86.

Шехтман Г.А., Череповский А.В. Выделение погребенного рифа различными модификациями метода ВСП по данным моделирования // Технологии сейсморастведки. 2008. № 4. С. 65-71.

Grech M.G.K., Lawton D.C., Gray S.H. A multioffset vertical seismic profiling experiment for anisotropy analysis and depth imaging // Geophysics, vol. 67, NO. 2, 348-354.

Gulati J.S., Stewart R.R., Parkin J.M. Analysing three-component 3D vertical seismic proailing data // Geophysics, vol. 69, 2004, 386-392.

Horne S. Fracture characterization from walkaround VSPs // Geophysical Prospecting, 2003, 51, 493-499.

Liu Q., Owusu J., Alnemer J. Fracture detection by P and C wave anisotropy from multi-azimuth VSP // SEG, New Orleans Annual Meeting, 2006, 3422-3426.

Maultzsch S., Nawab R., Yuh S., Idrees M., Frignet B. An integrated multi-azimuth VSP study for fracture characterization in the vicinity of a well // Geophysical Prospecting, 2009, 57, 263-274.

Shekhtman G.A., Zernov A.E., Potapov O.A., Lebedeva I.I., Sokolova K.B. Areal modification of the VSP method // 55th Annual Meeting of EAGE. 1993. Stavanger.

Wild P. Practical application of seismic anisotropy // First Break. 2011. May. V. 29. P. 117-124.

Winterstein D.F., De G.S. VTI documented // Geophysics. 2001. V. 66, N 1. P. 237-245.

Zhang Q., Stewart R.R., Sun Z. 3D-VSP survey design and data analysis // SEG's Ann. Mtg. Denver. 1996. Bg. 4.3. P. 190-193.