Кратные волны в методе вертикального сейсмического профилирования: проклятие или подспорье?

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

Обилие волн, регистрируемых внутри среды, приводило на начальном этапе внедрения в производство метода вертикального сейсмического профилирования (ВСП) в подлинное замешательство тех, кто в сложном волновом поле пытался выделить и изучить волны, представляющие разведочный интерес.

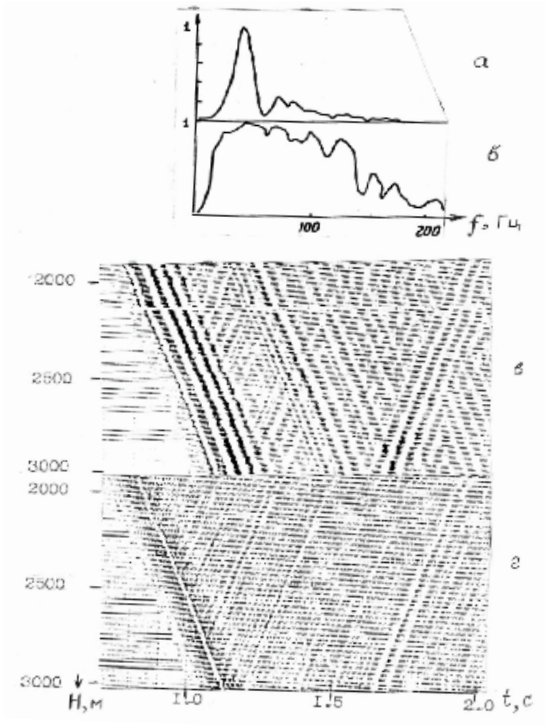
Особенно досаждали сейсморазведчикам падающие кратно отраженные волны, которые прослеживались, как правило, вдоль всего вертикального профиля. Вызваны они были последующими отражениями однократных волн от акустически резких границ, расположенных в приповерхностной зоне. Кратные падающие волны, воспринимаемые исключительно как помехи, отражались затем от сейсмических границ, расположенных под забоем скважины, и отличить их от однократных глубинных отражений без специальной обработки было невозможно. И лишь внедрение в практику обработки деконволюции по цугу падающих волн позволило подавить эти помехи, обеспечив тем самым однозначность глубинной (стратиграфической) привязки и высокую разрешенность волнового сейсмического поля.

Первым же стремлением было подавить кратно отраженные падающие волны непосредственно в процессе получения записей. Из соответствующих технических решений, представляющих уже лишь исторический интерес, можно вспомнить комбинированные приемники, содержащие в каждой точке вертикального профиля датчики давления и датчики скорости смещения (Гальперин, 1971). В основу комбинированного приемника было положено различие диаграмм направленности этих двух датчиков. Для датчика скорости (электродинамического сейсмоприемника) диаграмма направленности в полярных координатах представляет собой две соприкасающиеся сферы, поэтому волны одного типа (к примеру, сжатия), подходящие снизу и сверху, регистрируются в противофазе. Для датчика давления, диаграмма направленности которого представляет собой сферу, направление подхода волны не имеет значения, поэтому волны одного и того же типа вне зависимости от направления подхода регистрируются в фазе. Такое различие диаграмм направленности, положенное в основу комбинированного приемника, обеспечивало подавление волн, подходящих к приемнику сверху. При суммировании сигналов обоих датчиков при условии выбора требуемой полярности датчиков обеспечивалось подавление кратных волн. Аналогичный подход нашел применение в морской сейсморазведке, однако в методе ВСП он не нашел поддержки.

Возможность регистрации цуга падающих волн внутри среды позволила избавляться от кратных волн путем применения деконволюции по этому цугу, используя его в качестве опорного сигнала. Причем не только для деконволюции записей ВСП, но и данных наземной сейсморазведки. Приведем примеры.

На рис. 1 показано, что применение деконволюции по цугу падающих волн приводит не только к подавлению кратных волн, но и к расширению спектра.

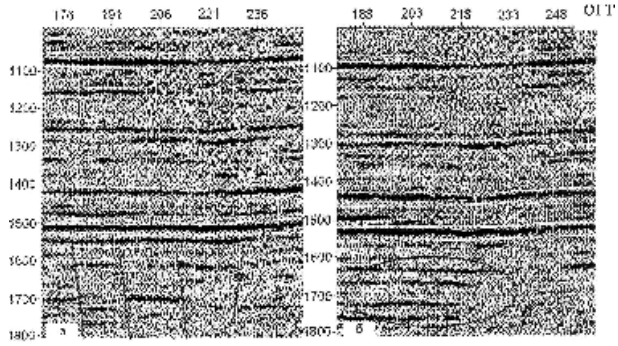
Использование цуга падающих волн в качестве опорного сигнала для деконволюции наземных временных разрезов



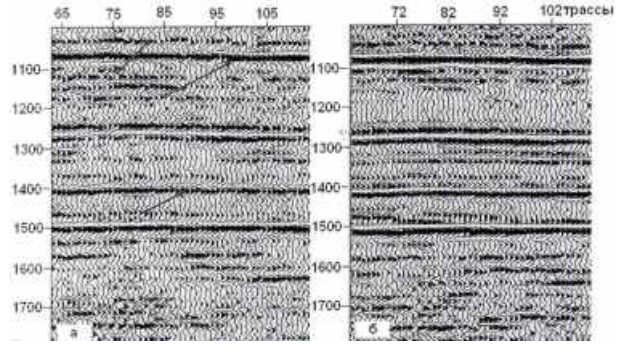
▲ *Рис. 1. Результаты применения деконволюции (Казахстан). а – спектр исходного импульса падающих волн; б – спектр импульса падающих волн после деконволюции; в – исходное волновое поле; г – волновое поле после деконволюции.*

приводит нередко к положительным результатам, несмотря на различие условий возбуждения и даже источников колебаний при проведении наземных и скважинных работ. На рис. 2 и рис. 3 приведены примеры улучшения прослеживаемости волн и их разрешенности после применения деконволюции по цугу падающих волн, регистрируемых при ВСП.

При вибрационной скважинной сейсморазведке цуг падающих волн, содержащий кратно отраженные волны, может использоваться в качестве опорного сигнала для одновременного выполнения двух задач: сжатия сигнала и подавления кратных волн (Шехтман, Кузнецов, 2005). В отличие от корреляционной обработки с опорным электрическим сигналом при этом достигается гораздо более высокая разрешенность записей (рис. 4).



▲ *Рис. 2. Пример использования импульсов падающих волн (данные ВСП) для деконволюции временного разреза МОГТ. После деконволюции (а) удалось более отчетливо увидеть тектонические нарушения, до этого забитые кратно отраженными волнами (б).*



▲ *Рис. 3. Пример использования импульсов падающих волн (данные ВСП) для деконволюции временного разреза МОГТ. После деконволюции (а) повысилась разрешенность границ (указаны стрелками), до этого отображающихся более многофазными сейсмическими реперами (б).*

Полезную информацию, содержащуюся в кратно отраженных волнах, можно довольно успешно использовать для количественной оценки относительной интенсивности кратных волн в наземной сейсморазведке (Музыка, 1969), а также для изучения отражающих и поглощающих свойств среды (Шехтман, 1984).

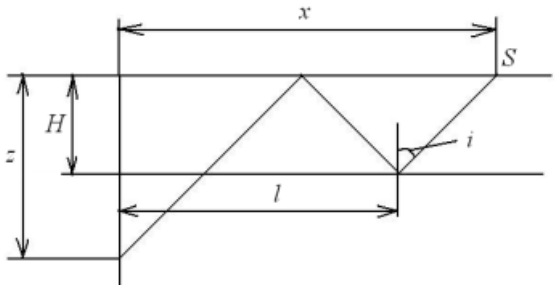
При формировании изображения среды (миграции) по записям, полученным при отработке скважины различными модификациями метода ВСП, можно использовать не только восходящие, но и падающие волны – обменные и кратно

отраженные. Участок освещенности отражающей границы падающими кратно отраженными волнами больше, чем однократно отраженными. Покажем это для двухслойной модели с горизонтальной границей раздела.

В условиях слабоконтрастной среды или отражающего горизонта в виде слоя, расположенного в однородной толще, искривлением луча с целью упрощения можно пренебречь. Тогда в принятых обозначениях (рис. 5) для расстояния точки отражения l от ствола скважины справедливо следующее соотношение:

$$l = x\frac{H+z}{2H+z},$$

где x – расстояние источника колебаний S от скважины, H – глубина отражающей границы, z – глубина точки приема в скважине.

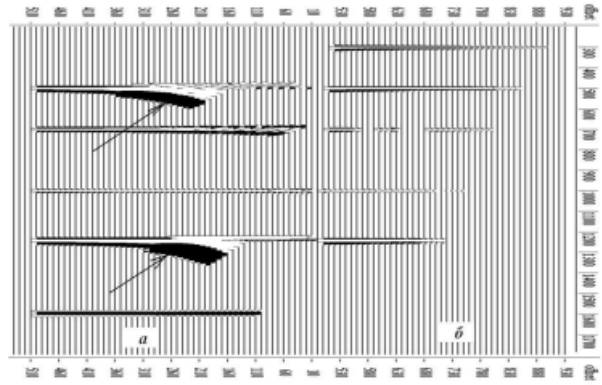


▲ *Рис. 5. К выводу формулы для участка освещенности кратно отраженной падающей волной.*

Видно, что $l \to x$ при $z \to \infty$. Т.е. при увеличении глубины приема кратно отраженной падающей волны точка отражения, расположенная на глубине *H*, смещается в направлении источника и асимптотически стремится к величине *x*. Если же точка приема находится в окрестности отражающей границы на глубине *H*, то $l = \frac{2}{3}x$.

При уменьшении глубины приема точка отражения смещается влево, и *l* асимптотически стремится к величине, равной *x/2*. Таким образом, участок освещенности отражающей границы падающими отраженными волнами будет расположен справа от точки на границе, находящейся посредине между источником и устьем скважины, в то время как для однократно отраженной волны участок освещенности расположен слева от средней точки между источником и устьем скважины. Учитывая это, можно при миграции записей ВСП достичь максимального освещения границы путем совместного использования однократных и кратно отраженных падающих волн.

На рис. 6 приведены результаты миграции модельных записей НВСП на продольных отраженных (а) и кратно отраженных (б) падающих волнах. Оба разреза представлены зеркально относительно друг друга. Видно, что разрез на однократных волнах дает освещение среды до удаления 500 м от скважины, а разрез на кратно отраженных падающих волнах – от 520 м до 820 м. Обращают на себя внимание ложные объекты, сформированные из закритических отражений на разрезе однократных отражений. Ложных объектов на разрезе по кратно отраженным волнам не наблюдается, поскольку углы падения лучей на отража-



▲ *Рис. 6. Глубинные разрезы НВСП, полученные путем миграции записей с однократными (а) и кратно отраженными падающими волнами (б). Стрелками показаны ложные объекты, сформированные при миграции из закритических отражений.*

ющую границу меньше критических. Отсутствие сигналов на отдельных трассах разреза по падающим волнам объясняется смещениями участков освещенности из-за преломления лучей при переходе точек приема из одного пласта в другой.

Возможность формирования изображения среды (миграции) по падающим кратно отраженным, а также обменным проходящим волнам, предусмотрена в системе обработки данных ВСП 3C-INTERACT (Кузнецов и др., 2011). Рассмотрим в качестве примера результаты миграции, полученные на одном из участков, расположенных в центре России.

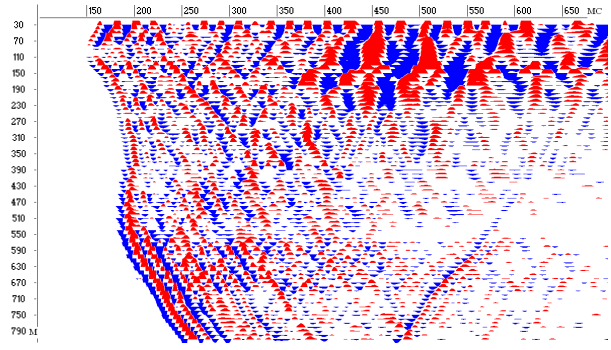
Исследуемый участок был расположен в пределах Окско-Цнинского вала, осложняющего южное крыло Московской верхнепалеозойской синеклизы. Поднятие, на котором расположен участок, хорошо изучено в процессе проведения работ на подземные хранилища газа (ПХГ).

Скважину глубиной 810 м отрабатывали из трех направлений. Ближний пункт возбуждения был расположен на удалении 100 м от скважины в направлении, составляющем 600 от направления географического меридиана. В этом же направлении с шагом 30 м между соседними положениями источника колебаний до удаления, равного 520 м, было отработано 15 физических наблюдений модификацией ВСП с подвижным источником колебаний (ВСП-ПИ). Из-за условий местности до устья скважина затем была отработана с фиксированного удаления, равного 520 м. Еще два непродольных ВСП (НВСП) было отработано в азимутах, составляющих 1900 и 2100 при удалениях ПВ, равных 630 м и 660 м.

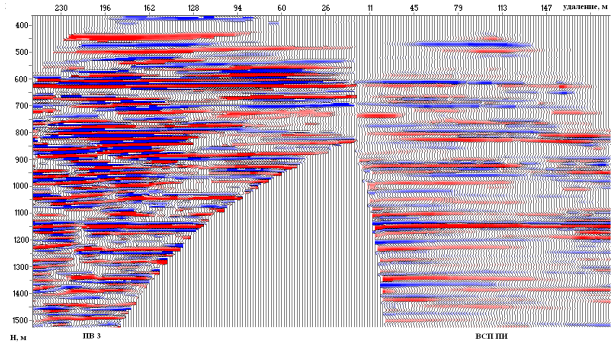
Волновая картина при отработке скважины нестандартной модификацией ВСП-ПИ в нижней части скважины типична для продольного вертикального профиля, а в верхней части – для непродольного. На z-компоненте (рис. 7) наиболее уверенно прослеживается отражение из-под забоя (указано стрелкой). Проследить другие отражения мешают падающие кратно отраженные волны.

Обработку записей ВСП осуществляли в рамках системы обработки и интерпретации данных ВСП 3C-INTERACT.

Видно, что на глубинном разрезе ВСП-ПИ зона «тени» под забоем скважины почти отсутствует, что определяется особенностями этой модификации метода ВСП (Шехтман и др., 2004). Качество глубинного разреза ВСП-ПИ заметно выше, чем аналогичного разреза НВСП (рис. 8). Проявляется это в более высокой динамической выразительности глубоких горизонтов, представляющих разведочный интерес.

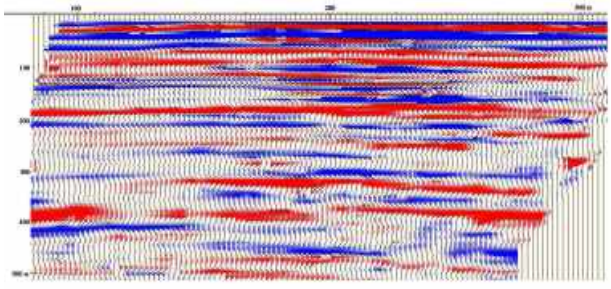


▲ *Рис. 7. Сейсмограмма на z-компоненте (комбинирование ВСП-ПИ и НВСП).*



▲ *Рис. 8. Глубинные разрезы, полученные путем миграции записей НВСП (слева) и ВСП-ПИ (справа).*

Одну из границ, расположенных на глубине 130 м от ротора (верейский горизонт) удалось построить по разрезам, полученным путем миграции падающих кратно-отраженных волн, поскольку однократно-отраженные волны, связанные с этой границей, проследить не удалось из-за помех, наиболее интенсивных в верхней части скважины. Наиболее уверенно этот горизонт и менее глубоко расположенные границы (вплоть до границы в приповерхностной зоне) прослеживаются на разрезе по падающим кратно-отраженным волнам, полученном путем миграции записей ВСП-ПИ (рис. 9).



▲ *Рис. 9. Глубинный разрез ВСП-ПИ, полученный путем миграции кратно-отраженных падающих волн.*

Заключение

Кратные волны, рассматривавшиеся на начальном этапе развития метода ВСП исключительно в качестве помех, несут в себе полезную информацию о параметрах геологического разреза и сигналах, формирующих волновое поле внутри среды и на земной поверхности. Кроме того, их можно непосредственно использовать для формирования изображения среды в верхней толще разреза, особенно в тех случаях, когда из-за низкого качества записей ВСП в верхней части скважины или из-за небольших выносов пункта возбуждения сделать это бывает невозможно. В существующих пакетах обработки данных ВСП для этого необходимо внести изменения, позволяющие обрабатывать данные, полученные различными модификациями метода ВСП с использованием различных типов и классов волн, включая падающие кратно отраженные волны.

Литература

Гальперин Е.И. Вертикальное сейсмическое профилирование//Недра, 1971, 264 с.
Кузнецов В.М., Шехтман Г.А., Попов В.В., Рыжков В.И. Обработка и интерпретация данных вертикального сейсмического профилирования в специализированной системе 3С-Interact. //Приборы и системы развед. геофиз., 2011. -№ 4, с. 17-21.

Музыка И.М. О влиянии особенностей разреза на интенсивность многократных волн (по данным вертикального сейсмического профилирования)//Изв. АН СССР. Сер. «Физика Земли», 1969, № 11, с. 36-50.

Музыка И.М. Изучение многократных отраженных волн методом вертикального сейсмического профилирования (ВСП) и опыт использования полученных данных при выборе интерференционных систем//Новые технические и методические разработки в сейсморазведке. М., 1969, с. 119-140.

Шехтман Г.А. Использование кратно отраженных волн для изучения разреза при ВСП// Разведочная геофизика, 1984, вып. 99, с. 20-24.

Шехтман Г.А., Кузнецов В.М., 2005, Деконволюция виброграмм ВСП – альтернатива корреляционной обработке или её подспорье?: Технологии сейсморазведки, 2, 80-85.

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