

## МЕТОДИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ВСП

*А.А. Табаков\**, *О.А. Мальцева\*\**, *Е.А. Фурсова\**,  
*Д.С. Чулкин\**, *Л.В. Севостьянов\*\**  
(\*ОАО «ЦГЭ», г. Москва, \*\*ООО «ГЕОВЕРС», г. Москва)

## METHODOLOGY OF VSP DATA PROCESSING

*A.A. Tabakov\**, *O.A. Maltseva\*\**, *E.A. Fursova\**,  
*D.S. Tchulkin\**, *L.V. Sevostyanov\*\**  
(\*CGE, Moscow, \*\*GEOVERS, Moscow)

**Аннотация.** Статья посвящена ключевым методологическим аспектам технологии обработки данных вертикального сейсмического профилирования (ВСП). Особое внимание уделено принципам анализа волновых полей ВСП, применение которых обеспечивает высокое качество и достоверность получаемых результатов обработки и интерпретации. Практическое использование предлагаемых принципов обработки иллюстрируется примерами на модельных и реальных данных.

**Summary.** The paper covers key aspects of technology of vertical seismic profiling (VSP) data processing. Special attention is paid to principles of VSP wave field analysis which are to provide high quality and reliability of acquired results of processing and interpretation. Practical implementation of the proposed methodological principles is illustrated with examples of synthetic and real data processing.

### 1. Введение

Метод вертикального сейсмического профилирования (ВСП), изобретенный Е.И. Гальпериним, в настоящее время широко используется в разведочной геофизике для детального изучения месторождений углеводородов и как самостоятельная технология, и в комбинации с наблюдениями поверхностной сейсморазведки.

Наблюдения методом ВСП естественным образом позволяют:

- изучать полное векторное волновое поле, возникающее в геологической среде;
- регистрировать и проводить оценку формы сигнала по прямой волне из источника и применять процедуру нуль-фазовой деконволюции;
- непосредственно определять пластовую скоростную модель среды путем решения обратной кинематической задачи по годографам различных типов волн;
- изучать эффекты анизотропии параметров среды;
- проводить динамическую инверсию амплитуд, восстанавливая распределение упругих характеристик разреза;
- получать высокодетальные сейсмические изображения околоскважинного пространства по различным типам волн;
- выполнять литолого-стратиграфическую привязку сейсмических отражений к целевым горизонтам в скважине.

Очевидно, что вышеперечисленные возможности и преимущества метода ВСП становятся доступны только в результате применения корректных процедур обработки исходных данных. В настоящей работе мы рассмотрим основные этапы и базовые методологические принципы обработки данных ВСП, выработанные за годы развития технологии.

## **2. Методика обработки данных ВСП**

### **2.1. Предварительная обработка**

На этапе предварительной обработки производится первичный анализ качества исходного материала, редактирование помех и отбраковка некондиционных сейсмограмм. Основными процедурами здесь являются:

- Расчет и ввод статических поправок за отметку момента.
- При наличии записей наземного контрольного прибора: компенсация неоднородности условий возбуждения (статические поправки и операторы для стандартизации формы сигнала).
- Определение годографа первых вступлений прямой волны. Помимо автоматической процедуры определения первых вступлений часто требуется ручная коррекция годографа, в особенности при наличии головных волн в записях с выносных пунктов возбуждения. При определении времен первых вступлений, как правило, используются модули трехкомпонентных сейсмических трасс.
- Оценка качества: расчет отношения сигнал/помеха в различных частотных диапазонах.
- Расчет поляризации прямой волны и ориентация исходных записей в соответствующую систему координат для подготовки волнового поля к декомпозиции. В системе координат PRT происходит предварительное разделение различных типов волн по поляризации. Компонента Р содержит прямую продольную волну, а также большую часть энергии обменных PSV волн. В R компоненте преобладают отраженные PP волны, а в компоненту Т попадают главным образом SH волны и волны, подходящие с боковых по отношению к лучевой плоскости направлений.

## **2.2. Кинематическая обработка**

На следующем этапе обработки происходит определение кинематических характеристик изучаемой среды: средних и интервальных скоростей (Р или S волн, в зависимости от заданного годографа), а также пластовой скоростной модели среды

путем решения обратной кинематической задачи для годографа первых вступлений прямой волны [4]. Отметим, что при использовании годографов других типов волн по наблюдениям ВСП представляется возможным восстановить двумерную скоростную модель не только для продольных, но и для поперечных волн. В противном случае пластовая скоростная модель для поперечных волн может быть подобрана вручную путем сопоставления синтетических времен вступлений обменных поперечных волн с соответствующими наблюдаемыми годографами. На рис. 1А приведены вертикальные годографы, а также средние, интервальные и пластовые скорости продольных и поперечных волн, полученные по данным ВСП.

При наличии наблюдений из нескольких пунктов возбуждения необходимо проводить оптимизацию скоростной модели среды с учетом времен вступлений из всех ПВ [7] и использовать полученную единую эффективную модель в дальнейшей обработке. На рис. 1Б представлен пример подбора пластовой скоростной модели продольных волн по наблюдениям из четырех пунктов возбуждения ВСП.

### **2.3. Разделение волнового поля**

Основной процедурой, влияющей на качество получаемых результатов при обработке данных ВСП, является разделение волновых полей. Этот процесс должен обеспечивать сохранение истинных динамических характеристик волн. Это достигается путем применения следующих принципов:

- *Аддитивность*. Этот принцип заключается в том, что во время обработки происходит не просто выделение целевых волн из исходного волнового поля с использованием их годографов, а именно разложение векторного волнового поля на составляющие. После любого преобразования сохраняется не только результат этой процедуры, но и разность между исходным полем и

результатирующим. Таким образом, после процедуры разделения имеются как поля целевых волн, так и волн-помех («звон колонны», гидроволны), поля нерегулярных помех (гармонические шумы, пиковые выбросы), а также поле остатков после вычитания всех выделенных полей. На рис. 2 приведен пример разделения волнового поля на составляющие: поле выделенных нерегулярных помех (гармонические шумы и др.), поля падающих и отраженных P-волн, падающих и отраженных обменных PS-волн, поле гидроволн и поля остатков.

- *Модель-базируемость.* На этапе разделения волновых полей уже имеется скоростная модель среды, построенная как результат кинематической инверсии годографов всех ПВ. Причем это могут быть не только годографы первых вступлений, но и уверенно коррелируемые годографы других волн. Эту информацию о скоростях целесообразно использовать для создания первого приближения в процедурах разделения волн. С использованием моделирования можно осуществить спрямление осей синфазности целевых волн (вывод на вертикаль), а также осуществить разворот трехкомпонентного волнового поля в следящую компоненту, где сосредоточена большая часть (при адекватности модели) энергии целевой волны [8]. Особенно важно применение скоростной модели и моделирования при разделении волн, имеющих близкие кажущиеся скорости и поляризацию, таких как, например, отраженные обменные PS-волны и отраженные PSS-волны (монотипные отражения от падающей обменной волны).
- *Итеративность.* Принцип итеративности заключается в поочередном выделении волн с учетом их интенсивности и дальнейшем уточнении их параметров в отсутствие других волн. На первой итерации при выделении целевой волны используются большие размеры базы осреднения для того, чтобы

в поле целевой волны не попали другие волны. Таким образом, после первой итерации выделенные волновые поля практически не содержат волн других типов. Однако искажены (сглажены по глубине) их истинные параметры, а остатки волнового поля (поля после вычитания всех выделенных волн) содержат часть энергии выделенных волн. Далее к остаткам поочередно добавляются выделенные волны, и уточняются как их параметры, так и параметры скоростной модели. Выделение волны осуществляется уже на меньшей базе. Этот процесс продолжается до тех пор, пока поле остатков не перестанет содержать коррелируемых волн.

#### **2.4. Деконволюция**

Следующей процедурой является деконволюция (оптимальная обратная фильтрация) волновых полей по форме импульса падающей волны, в результате которой повышается разрешенность записи, а форма сигнала приводится к нуль-фазовой. При этом основным принципом является максимальное расширение спектра при данном соотношении сигнал-шум. На рис. 3 показан пример применения деконволюции: приведены поля падающих и отраженных волн до и после деконволюции, а также их спектры. Спектр отраженных волн расположен в диапазоне 8-150 Гц, что, вообще говоря, не является пределом при качественно проведенных работах ВСП [2].

Деконволюция применяется ко всем волновым полям, полученным на этапе декомпозиции исходного поля. Так как в результате деконволюции существенно повышается разрешенность записи, то в некоторых случаях после нее могут проявиться волны-помехи, ранее маскируемые более сильными волнами за счет интерференции. Кроме того, расширение спектра, как правило, приводит к увеличению уровня шумов.

Поэтому после деконволюции является целесообразным проведение еще одной или нескольких итераций процедуры по разделению волнового поля для уточнения параметров целевых волн.

## **2.5. Заключительный этап обработки**

Заключительным результатом обработки данных ВСП из ближних ПВ является трасса однократных отражений монотипных Р волн, используемая затем

- для привязки данных наземной сейсморазведки к данным ГИС и литологическому разрезу в скважине;
- в качестве исходных данных для процедуры динамической инверсии, применяемой с целью восстановления распределения упругих параметров разреза (в частности, акустического импеданса) [5].

Трасса однократных отражений обычно получается в результате процедуры коридорного суммирования поля отраженных продольных волн, выведенного на двойные времена пробега и преобразованного в следящую компоненту. Следует отметить, что применение коридорного суммирования правомерно в случае, когда оси синфазности всех волн приведены к вертикали, что возможно только при использовании точной эффективной скоростной модели для расчета кинематических поправок. В противном случае (когда доступна лишь упрощенная модель среды) трасса однократных отражений может быть получена с помощью специальной методики для оценки углов наклона отражающих границ в локальной окрестности скважины [6].

В случае, когда значительная часть рассеянной энергии переходит в обменные волны, рассмотрения трассы однократных отражений продольных волн для восстановления упругих характеристик среды недостаточно. В этом случае необходимо учитывать эффекты обмена, что может быть сделано путем применения алгоритма

векторной лучевой инверсии [1], использующем трехкомпонентные трассы отражения/обмена трех типов волн: монотипных PP, обменных отраженных PS и обменных проходящих PS. Результатом такой инверсии является распределение вдоль профиля наблюдений коэффициентов отражения PP и SS, соответствующих нормальному падению на границу раздела.

При обработке данных ВСП из дальних пунктов возбуждения на заключительном этапе строится сейсмическое изображение окоскважинного пространства с помощью процедуры миграции, применяемой к тому или иному типу волнового поля, полученного в результате декомпозиции исходного поля. При этом если строятся изображения по различным типам волн, необходимо решать вопрос об их совмещении, то есть наложении с предварительным преобразованием в общую физически значимую норму, в качестве которой может быть снова выбран, например, коэффициент отражения PP вдоль нормали к границе [3]. С другой стороны, целесообразно рассматривать задачу миграции в общей постановке в виде следующей трехэтапной процедуры: экстраполяция полного волнового поля упругих колебаний с профиля регистрации во внутренние точки среды – декомпозиция экстраполированного поля во всех точках изучаемого пространства – векторная инверсия и получение коэффициента отражения вдоль нормали в каждой точке среды. Такой метод миграции при построении сейсмического изображения инкорпорирует информацию обо всех основных типах волн, образующихся в среде, а амплитуды на получаемых разрезах будут ясно означать перепад акустической жесткости в направлении внешней нормали к границе раздела тел (рис. 4).



## **Заключение**

Применение указанных принципов при обработке данных ВСП позволяет получить результаты высокого качества. На рис. 5 приведен пример увязки данных ГИС-ВСП-ОГТ. После того, как проведена увязка данных ВСП и наземной сейсморазведки, становится возможным повысить разрешенность разреза ОГТ (рис. 5А) за счет дополнительной деконволюции, приводящей форму сигнала ОГТ к форме сигнала трассы однократных отражений ВСП (рис. 5В).

Сопоставление кривой акустического импеданса по ВСП с данными ГИС (кривая ГГК и АК) свидетельствует о детальном совпадении данных ВСП и ГИС, при котором исключены ошибки в скоростных характеристиках среды, полученных по ВСП, и, следовательно, в привязке данных наземной сейсморазведки к литологическому разрезу в скважине.

## **Список литературы**

1. А.В. Баев, И.В. Яковлев, А.А. Табаков, И.Е. Солтан. 2004. Векторная миграция данных ВСП. Технологии сейсморазведки. 1. С. 4-9.
2. Е.И. Гальперин. Вертикальное сейсмическое профилирование. Опыт и результаты. 1994. М.: Наука. 320 с.
3. А.В. Решетников, Ю.А. Степченков, А.А. Табаков, В.Л. Елисеев. 2004. Построение совмещенного изображения среды по волнам разных типов. Материалы научно-практической конференции «Гальперинские Чтения – 2004». Москва. С. 60-62.
4. И. В. Савин, Г. А. Шехтман. Обратная кинематическая задача ВСП для сред с неплоскими границами раздела. 1995. Прикладная геофизика. 129. С. 34-46.

5. А.А. Табаков. Оценка геолого-геофизического разреза ниже забоя разведочной скважины по данным ВСП. 1975. Труды СреднеазНИИ геологии и минералогии сырья. 18. С. 69-72.
6. А.А. Табаков, А.В. Баев, К.В. Баранов, И.В. Яковлев. 2004. Методика DIPSCAN изучения околоскважинного пространства. Технологии сейсморазведки. 1. С. 62-65.
7. А.А. Табаков, И.Е. Солтан, К.В. Баранов, А.К. Душутин. 2001. Определение параметров анизотропной параллельно-слоистой модели среды путем оптимизационного решения обратной кинематической задачи для годографов первых вступлений ВСП из нескольких пунктов возбуждения. Материалы научно-практической конференции «Состояние и перспективы развития метода ВСП», Москва, С. 70-73.
8. В.Н. Ференци, И.Е. Солтан, А.А. Табаков, К.В. Баранов. 2003. Обработка данных ВСП на базе 1D-3D модели среды. Материалы международной конференции «Геофизика XXI века – прорыв в будущее», Москва.

## Список рисунков

1. Кинематическая обработка данных ВСП: А – средние, интервальные и пластовые скорости продольных и поперечных волн; Б – подбор скоростной модели среды по годографам нескольких пунктов возбуждения ВСП.
2. Исходное волновое поле и его составляющие.
3. Расширение спектра отраженных волн путем применения деконволюции по форме импульса.
4. Концепция векторной миграции данных ВСП: А – традиционное сейсмическое изображение целевого объекта; Б – пример миграции модельных данных ВСП методом Кирхгоффа; В – сейсмическое изображение целевого объекта в терминах коэффициента отражения вдоль нормали; Г – пример векторной миграции модельных данных ВСП.
5. Увязка данных ВСП, ГИС и ОГТ: 1 – кривая АК; 2 – кривая ГГК; 3 – акустический импеданс по ГИС; 4 – акустический импеданс по ВСП; 5 – трасса однократных отражений ВСП (в глубинном масштабе); А – фрагмент разреза ОГТ; В – фрагмент разреза ОГТ после деконволюции; С – трасса однократных отражений ВСП (во временном масштабе).