УДК 550.834

А.Н.ТЕЛЕГИН, *д-р геол.-минерал. наук, профессор, an_telegin@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

A.N.TELEGIN, *Dr. in geol. & min. sc., professor, an_telegin@mail.ru*
National Mineral Resources University (*Mining University*), *Saint Petersburg*

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДА ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН

Приведена общая схема обработки, включающая шесть операций, которые преобразуют полевые сейсмические записи в изменение упругие свойства изучаемой геологической среды. Рассмотрены физическое назначение и необходимость выполнения каждой операции обработки. За счет многократности выполнения четырех операций (учет влияния верхней части разреза, определение скоростей, ослабление помех и повышение разрешенности записей) формируется реальный граф обработки материалов.

***Ключевые слова*:** обработка материалов, общая схема, операции, упругие свойства.

FEATURES OF PROCESSING OF SEISMIC MATERIALS OF A METHOD OF THE REFLECTED WAVES

Bring the general scheme of processing including six operations which will transform field seismic recordings to change of elastic properties of the studied geological environment. Considered physical appointment and necessity of performance of each operation of processing. At the expense of recurrence of performance of four operations (the account of influence upper part of section, definition of speeds, easing of hindrances and increase detectability records) is formed a real processing graph of materials.

***Key words*:** data processing, general scheme, operation, elastic properties.

Исходные материалы и результаты обработки. В сейсморазведке обработка – процесс последовательного преобразования исходных (полевых) сейсмических записей в упругие свойства изучаемой геологической среды. Упругие свойства определяются по кинематическим и динамическим параметрам полезных сейсмических волн на наборах записей, соответствующих каждому элементарному объему изучаемой геологической среды. Этот набор в методе отраженных волн (МОВ) обеспечивается сейсмограммой общей средней точки (ОСТ), получаемой в каждом бине при полевых работах. В процессе обработки материалов сейсмограммы ОСТ преобразуются в наборы записей, соответствующие общей вертикали разреза (ОВР), последние и используются для определения упругих свойств геологической среды и ослабления высоко- и среднескоростных волн-помех.

В обработку могут поступать материалы, полученные при трехмерной (3D) или двумерной (2D) съемке с различной системой наблюдений: с получением в каждом бине площадного набора записей или одной записи, в частности в МОВ, например, профильные записи способа центрального луча (СЦЛ). В зависимости от этого меняются возможности обработки и получаемые результаты*.

**Телегин А.Н.* Методика и технология сейсморазведочных работ методом отраженных волн / Санкт-Петербург. горный ин-т. СПб, 2010. 83 с. + 5 вклеек.

Telegin A.N. Technique and technology of seismoprospecting works as a method reflected wave / Saint-Petersburg State Mining Institute. Saint Petersburg, 2010. 83 p. + 5 inserts.

Сейсмические записи являются результатом наложения регулярных волн (полезных и помех) различной амплитуды и формы, технических и технологических помех и случайных колебаний:

$$A(M,N,t) = S(M,N,t) + P(M,N,t) + n(N,t),$$

где M и N – координаты источника и приемника; $S(M,N,t)$ – полезные волны, например, в МОВ это продольные однократно отраженные и дифрагированные волны, обусловленные изменением упругих свойств в геологической среде и формой импульса падающей волны; $P(M,N,t)$ – регулярные сейсмические волны-помехи (кратные, поверхностные и пр.); $n(N,t)$ – случайные сейсмические колебания, а также технологические и технические помехи, которые зависят от положения приемника и времени регистрации.

При этом предполагается, что помехи аддитивны – они добавляются к записи полезных волн, т.е. действует принцип суперпозиции волн.

Обработка основана на физических особенностях распространения упругих волн в геологической среде, она решает обратную задачу сейсморазведки: определяет упругие свойства изучаемой среды по сейсмическим записям, полученным в результате возбуждения и регистрации упругих волн на ее поверхности (или в скважине)[*].

Упругие свойства, в частности скорости распространения волн, акустическая жесткость и другие параметры, в геологическом разрезе меняются сложным образом: в осадочных отложениях скорости постепенно нарастают с глубиной с некоторыми вариациями для отдельных литологических разностей, в метаморфизованных и изверженных породах скорости меняются меньше. Изменение акустической жесткости с глубиной можно представить в виде ступенчатых функций различной амплитуды (рис.1). В частотной области кривые акустической жесткости имеют, соответственно, амплитудные спектры в широкой полосе частот, начиная от постоянных значений. Поэтому и изучение упругих свойств геологической среды сейсморазведкой должно выполняться в широком диапазоне частот: от постоянных значений упругих свойств толстых пластов до высокочастотных значений, соответствующих тонким пластам.

Существует две независимые возможности изучения упругих свойств геологической среды сейсморазведкой по параметрам полезных отраженных волн. По временам прихода определяются скорости распространения волн – $V(X,Y,Z)$, глубина и конфигурация границ, а по амплитудам – ряд упругих параметров (изменение акустической жесткости на границах $\rho V(X,Y,Z)$, коэффициент Пуассона и др.).

Изучение скоростей распространения упругих волн связано с формой годографов полезных волн, в частности, в МОВ по ним наиболее надежно определяются постоянные или медленно меняющиеся значения скоростей – толсто-слоистая модель геологической среды (низкие частоты упругих свойств). Изучение деталей скоростного разреза по временам прихода волн ограничено погрешностью измерения времен распространения упругих волн. Эффективные скорости в МОВ (или обратная им величина – медленность) вычисляются по изменению формы годографа с расстоянием, т.е. по dt/dL, а пластовые (или интервальные) скорости – еще и по градиенту эффективных скоростей с глубиной, по $d^2t/dLdt_o$. Соответственно, возрастают погрешности вычислений, которые и ограничивают возможности изучения упругих свойств тонких пластов при уменьшении мощности пластов.

По амплитудам отраженных волн, прежде всего, находят изменение акустической жесткости в геологической среде. В частности, при отражении по нормали к границе амплитуда отраженной волны наиболее простым образом связана с изменением акустической жесткости на границе, кроме того, используется изменение амплитуд отраженных волн в зависимости от угла падения на границу. Амплитуды отраженных

[*]Морская сейсморазведка / Под ред. А.Н.Телегина. М.: ООО «Геоинформарк», 2004. 237 с.

Sea seismic prospecting / Under the editorship of A.N.Telegina. Moskow: Open Company «Geoinformark», 2004. 237 p.

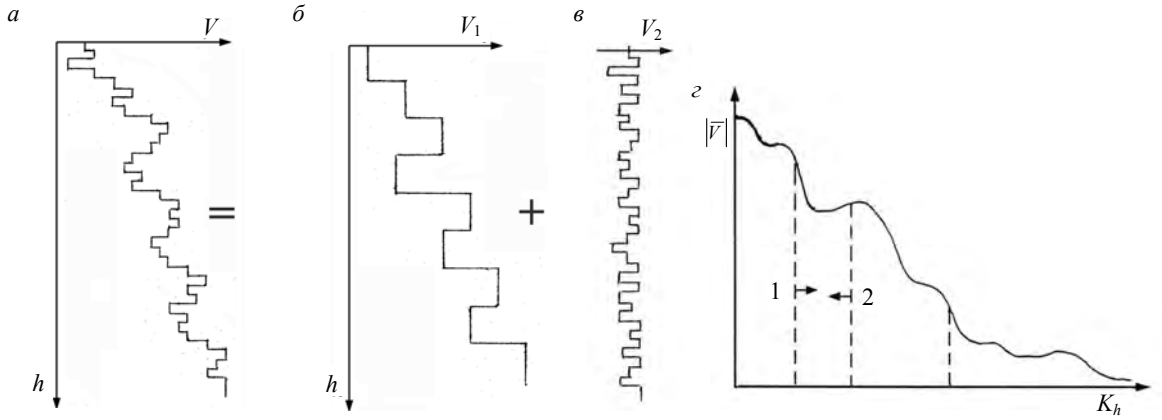


Рис.1. Определение упругих свойств изучаемой среды по временам и амплитудам отраженных волн: *а* – изменение акустической жесткости в геологической среде; *б* – толсто-слоистая скоростная модель среды, определяемая по временам прихода волн; *в* – детали изменения акустической жесткости разреза, определяемые по амплитудам сейсмических волн; *г* – спектральное представление изменения акустической жесткости в среде; 1 – часть спектра, соответствующая толсто-слоистой среде (*б*); 2 – то же, соответствующая деталям скоростного разреза (*в*)

волн также регистрируются с некоторой погрешностью, однако при вычислении акустической жесткости происходит интегрирование амплитуд и понижение спектра результата, соответственно, уменьшается влияние погрешностей амплитуд на определение акустической жесткости.

Чтобы определять весь спектр изменения упругих свойств в геологической среде, необходимо регистрировать времена прихода волн с высокой точностью и иметь амплитудные спектры сейсмических записей в широкой полосе (от нулевых значений до очень высоких частот). Однако определение упругих свойств пород по амплитудам отраженных волн (динамике сейсмических записей) ограничено со стороны как низких, так и высоких частот. Со стороны низких частот ограничение обусловлено физическими особенностями образования и распространения упругих волн как колебательного процесса (постоянные смещения не распространяются). Со стороны высоких частот ограничение связано с формированием импульса в источнике, а также с большим поглощением и рассеиванием энергии высоких частот при распространении волн и использованием различных низкочастотных фильтраций в процессе обработки материалов.

Упругие свойства, найденные по кинематическим и динамическим свойствам волн, вместе должны дать полное представление об упругих свойствах изучаемой геологической среды. При этом скорости распространения упругих волн характеризуют толсто-слоистую (низкочастотную) составляющую упругих свойств среды, а детали упругих свойств разреза определяются по амплитудам волн.

В обработке сейсмических записей всегда используются кинематические и динамические свойства волн. При кинематической обработке к динамике волн обращаются только в процессе их корреляции для построения полей времен, дальнейшая обработка выполняется только по годографам. Соответственно, и результаты обработки содержат упругие свойства, найденные только по кинематике волн: положение и конфигурация отражающих или преломляющих границ и значения пластовых и граничных скоростей (толсто-слоистая модель среды). В общем случае в результатах обработки любых сейсмических материалов МОВ должна быть представлена вся зарегистрированная информация о полезных волнах: кинематическая и динамическая, часто такую обработку называют динамической.

Оптимальность обработки заключается в том, чтобы полностью реализовать те возможности, которые были заложены при полевых наблюдениях: выделить полезные волны и определить по ним акустические свойства изучаемой геологической среды. Оптимальность применяемой методики работ и обработки материалов определяется

надежностью (однозначностью) геологической интерпретации полученных результатов сейсмических работ.

Возможности сейсморазведки и обработки материалов по изучению упругих (акустических) свойств геологической среды определяются в процессе полевых работ, а реализуются при обработке полученных материалов. При обработке нельзя получить информации больше, чем зарегистрировано при проведении полевых работ, но можно извлечь не всю информацию, содержащуюся в исходных сейсмических записях.

В полевых сейсмических записях содержится информация об изменении упругих свойств в изучаемой геологической среде, параметрах и положении источника колебаний, особенностях строения верхней части разреза (ВЧР) и др. Информация заключена в свойствах различных волн, включая полезные волны и помехи. В процессе обработки необходимо извлечь сведения об упругих свойствах глубинной среды, которые заключены во временах прихода и амплитудах полезных волн.

Наиболее строгая обработка возможна только по материалам 3D-съемки, обработка материалов 2D-съемки в сложных геологических условиях не однозначна, и только при геологическом строении среды, близком к двухмерному, ее надежность повышается.

Общая схема обработки сейсмических материалов. В общем случае для получения окончательного результата необходимо выполнить шесть операций (рис.2).

Каждая из операций решает свою важную задачу обработки, связанную с особенностями образования и распространения упругих волн в геологической среде и определения упругих свойств по параметрам полезных сейсмических волн. Операции обработки состоят из отдельных процедур, для выполнения операции используется одна или несколько процедур. Конкретная последовательность выполнения процедур называется графом обработки. При выполнении отдельных процедур параметры их тестируются для выбора оптимальных значений.

Шесть перечисленных операций составляют полный цикл обработки сейсмических материалов, т.е. решают обратную задачу сейсморазведки, превращая исходные записи в изменение упругих свойств изучаемой геологической среды. Любая обработка сейсмических материалов: ручная (кинематическая) – с построением отражающих площадок и преломляющих границ или цифровая (с использованием кинематических и динамических свойств волн) – с получением детального разреза упругих свойств – входит в рамки этой общей схемы как частный случай.

Обработка любых сейсмических материалов МОВ выполняется в соответствии с общей схемой, но конкретные операции в каждом методе имеют свою специфику из-за физических особенностей образования и распространения полезных волн и помех и имеющейся технологии обработки. В частности, обработка площадных материалов 3D и 2D аналогична, отличие в объемах, возможностях обработки, результатах и затратах времени на обработку.

Рассмотрим вначале кратко назначение отдельных операций обработки, а затем подробно особенности их применения в МОВ и последовательность выполнения (граф обработки).

Учет влияния ВЧР на сейсмические записи. Сейсмические работы проводятся не в лаборатории, а на местности с ее реальными сложными поверхностными условиями. Трудно найти более сложный физический эксперимент, чем проведение сейсмических работ в реальной обстановке, поскольку ВЧР искажает кинематику и динамику сейсмических волн. Мы смотрим на глубину как бы через неровную поверхность стекла с меняющейся толщиной, с царапинами и трещинами. Благодаря учету влияния ВЧР происходит сглаживание поверхности стекла, в результате удается лучше увидеть то, что на глубине. Во многих районах учет влияния ВЧР и статистический эффект осреднения покрывающей среды имеет не меньшее значение, чем направленность суммирования сейсмограмм ОСТ в МОВ.

Разделение геологической среды на ВЧР и глубинную среду происходит по характеру изменения упругих свойств. В верх-



Рис.2. Общая схема обработки сейсмических материалов

ней части геологического разреза упругие свойства пород очень резко меняются по глубине и площади исследований; ниже скорости меняются плавно, и этот разрез уже относится к глубинной среде, которая подлежит изучению.

Влияние ВЧР сказывается на временах прихода волн, их интенсивности и форме импульсов (амплитудном и фазовом спектре), т.е. на кинематике и динамике глубинных волн, и это влияние необходимо учитывать особо. Учет влияния ВЧР на сейсмические записи основан на анализе их времен, амплитуд и спектров на различных наборах записей ОСТ, общей точки возбуждения (ОТВ) и общей точки приема (ОТП). Поэтому наиболее эффективно он осуществляется по материалам площадных многократных съемок, в частности 3D.

Операция учета ВЧР почти всегда выполняется на суше и реже на море.

Изучение скоростей распространения упругих волн. Одной из основных операций обработки является изучение скоростей распространения упругих волн в глубинной геологической среде $V(X,Y,Z)$. Для оптимального выделения полезных волн и учета сейсмического сноса необходимо знать кинематические свойства (форму годографов) полезных волн и помех или скорости их распространения в глубинной среде. Изученный скоростной разрез (модель эффективных, пластовых или граничных скоростей) используется не только для оптимального выполнения последующих процедур обработки, например определения положения и конфигурации границ (миграции, пересчета в линейный масштаб глубин), но и является первым толсто-слоистым приближением к изучаемым упругим свойствам геологической среды и используется при геологической интерпретации результатов сейсморазведки.

Операция выполняется всегда, кроме обработки материалов СЦЛ, когда нет годографов волн и при этом отсутствуют дифрагированные волны.

Выделение полезных волн (ослабление помех). Ослабление помех – одна из наиболее важных операций обработки сейсмических материалов. Из всей зарегистрированной волновой картины необходимо выделить полезные волны без искажения их свойств или ослабить все сейсмические помехи до такого уровня, чтобы они не искажали результаты сейсморазведки.

Разделение волн и ослабление помех основано на различии кинематических и динамических свойств полезных волн и помех. В соответствии с этим применяются одноканальные и многоканальные фильтры, в частности, и интерференционные системы. Одноканальные фильтры используют различие динамики сейсмических волн (амплитудные

и фазовые спектры), а многоканальные – различие кинематики и динамики волн.

В последовательном решении обратной задачи сейсморазведки ослабление волн-помех позволяет перейти от сложной (реальной) волновой картины, когда помехи часто интенсивнее полезных волн, к преобладанию интенсивности полезных волн, т.е. к идеализированной физической модели геологической среды, дальнейшая обработка нацелена уже только на полезные волны.

Эту операцию можно не применять только в одном случае – когда совсем нет сейсмических помех (если такой случай возможен на практике).

Учет сейсмического сноса (миграция) записей. Сейсмические волны образуются на различных элементах геологической среды, а регистрируются при некотором положении приемников и источников, т.е. существует сейсмический снос элементов среды, где образовались волны, относительно места их регистрации.

Для определения истинного положения и конфигурации сейсмических (геологических) границ и объектов дифракции необходимо в процессе обработки учесть сейсмический снос отраженных и дифрагированных волн в МОВ, т.е. переместить полезные волны на те участки геологической среды, где они образовались (выполнить миграцию записей).

После выполнения миграции получается волновое изображение геологической среды, каждый элемент ее дискретизации охарактеризован отраженными (или преломленными) волнами. При съемке 3D получается результативный куб в системе с координатами (X,Y,Z/t), где Z – вертикаль в среде, t – двойное время вдоль вертикали, а в случае 2D-съемки – разрез в координатах (X,Z/t) в плоскости, нормальной к отражающим границам.

Место выполнения операции миграции в графе обработки материалов зависит от сейсмогеологических условий изучаемой площади. В общем случае операция миграции должна выполняться по исходным сейсмическим записям с пластовой моделью скоростей (глубинная миграция), но в простых сейсмогеологических условиях она может применяться в приближенном варианте к суммарным разрезам ОСТ с моделью эффективных скоростей (временная миграция).

Учет сейсмического сноса миграции почти всегда используется в обработке материалов.

Повышение разрешенности сейсмических записей (детальности изучения упругих свойств). Результатом обработки должен быть детальный разрез упругих свойств изучаемой геологической среды, однако при возбуждении, распространении упругих волн и выполнении операций обработки (особенно по ослаблению помех) происходит неизбежное снижение разрешающей способности сейсмических записей: понижение и сужение полосы частот и, соответственно, увеличение длительности отраженного импульса. Необходимо расширить полосу частот полезных волн (уменьшить длину импульса).

Операция повышения разрешенности обычно выполняется с помощью процедур выравнивания спектров сейсмических записей – обратной фильтрации (деконволюции). Деконволюция применяется для решения двух задач: ослабления реверберации и кратных волн на море и на суше и сжатия отраженного импульса, т.е. компенсирует удлинение сейсмического импульса за счет распространения в среде и фильтрации в процессе обработки материалов.

Необходимость выполнения этой операции определяется требованиями к детальности расчленения изучаемого геологического разреза, и в процессе обработки материалов операция осуществляется многократно.

Расчет упругих свойств геологической среды по динамическим свойствам полезных волн. Обычно последней операцией обработки является определение упругих свойств геологической среды по амплитудам отраженных и дифрагированных волн, т.е. вместе с результатами изучения скоростей распространения волн (толсто-слоистым скоростным разрезом) получают детальный разрез упругих свойств изучаемой геологической среды.

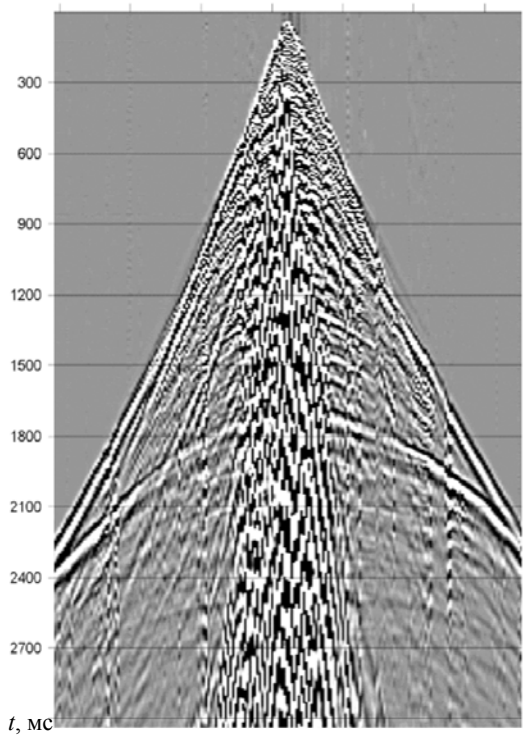


Рис.3. Полевая сейсмограмма общей точки возбуждения

Для определения упругих свойств по изменению амплитуд (динамике) волн необходимо иметь площадной набор записей, соответствующий минимальному размеру геологической среды, например в МОВ – эффективной отражающей площадке.

По значениям амплитуд отраженных волн вдоль нормалей к границам вычисляется изменение акустической жесткости в среде, а по изменению амплитуд в зависимости от угла падения на границу – различные упругие константы.

Эту операцию пока выполняют не всегда или осуществляют частично, иногда уже в процессе интерпретации полученных результатов.

В качестве примера результатов обработки приведена исходная сейсмограмма, полученная при полевых сейсмических работах (рис.3), и сечение куба сейсмических записей вдоль источников на одной из площадей в Тимано-Печорской провинции (рис.4).

Для выполнения операции может использоваться одна или несколько процедур, решающих конкретную задачу обработки в пределах операции. Процедуры оформляются в виде модулей обработки. Учет сейсмического сноса (миграция временных разрезов) может осуществляться с помощью одной процедуры (модуля). Остальные операции состоят из нескольких процедур, например: процедуры ввода кинематики, обнуления части записи, суммирования и др.

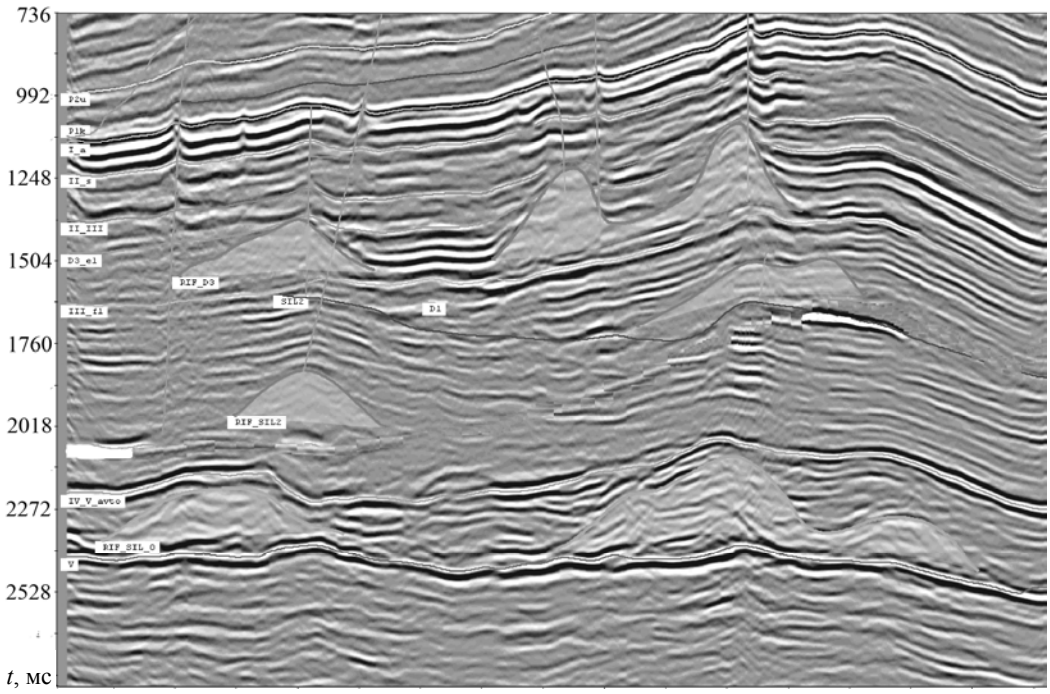


Рис.4. Результаты обработки полевых сейсмических записей (вертикальный сейсмический разрез)