

Е. Ю. Гошко¹, С. М. Зеркаль²

¹ФГУП «СНИИГГиМС»
Красный пр., 67, Новосибирск, 630104, Россия
E-mail: goshcoeu@ngs.ru

²Институт математики СО РАН
пр. Акад. Коптюга, 4, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: zerkal@ngs.ru

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО ДИНАМИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЛОКАЛЬНЫХ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ*

В настоящее время происходит активное вовлечение в сейсморазведочные работы более глубоких горизонтов земной коры со сложным геологическим строением. Соответственно этому усложняются алгоритмы обработки и растет ее объем. В среднем методы обработки требуют выполнения около 10^5 операций; имеется тенденция к росту годового объема информации в десятки раз за каждые пять лет [Алексеев, Цибульчик, 1985]. Новые данные требуют дальнейшего совершенствования математических моделей изучаемых объектов. Сами модели при этом рассматриваются как средство количественного описания объектов и как фактор, формирующий с количественной и качественной стороны меру получаемой об объекте информации.

Полученная в последнее время сейсмическая информация о глубинном строении земной коры и верхней мантии позволяет сделать вывод о том, что оно отличается от горизонтально-слоистого и соответствует гетерогенной модели среды [Караев, Рабинович, 2000. С. 91–93]. Свойство гетерогенности определяется неравномерностью распределения в пространстве геологических неоднородностей разного масштаба, которые имеют разнообразную геологическую природу и проявляются в изменении физических параметров. При распространении в такой среде волнового процесса возникают различные типы волн: отраженные, дифрагированные и рассеянные. Выделение полезной информации из большого объема регистрируемой является существенным фактором повышения эффективности сейсморазведочных работ. Наряду с достаточно хорошо разработанным кинематическим подходом к решению практических задач в сложных средах стали применяться интерференционные системы (например, ОГТ – общая глубинная точка), в которых задействована динамика сейсмических волн [Зеркаль, Соппа, 2003].

Изучению динамических характеристик сейсмических волн способствует в настоящее время наличие хорошо калиброванных сейсмограмм, предоставляющих данные об отражениях в истинных амплитудах. Одним из ключевых способов получения информации о свойствах объектов неоднородной среды является вычисление формы локальных волновых пакетов по сейсмической трассе ОГТ. Именно это обстоятельство делает возможным анализ таких динамических характеристик, как форма локального волнового пакета, максимальная амплитуда, спектральный и энергетический состав сложного интерференционного отражения.

В настоящей работе предложена вычислительная технология расчета куба спектральных амплитуд локальных волновых пакетов в пространстве временной и латеральной координат сейсмического разреза ОГТ и частоты (t, x, f). Визуализация куба спектральных амплитуд

* Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 06-01-81000-Бел_а) и междисциплинарной программы СО РАН «Интеграция» (грант № 10).

в виде среза на определенной частоте f или в интересующем интервале частот $f_1 \leq f \leq f_2$ позволяет исследовать эффект аномального затухания амплитуд сейсмических волн в области средних и высоких частот. Этот динамический эффект связан с важными параметрами прогноза полезных ископаемых: повышенной трещиноватостью, разломами и разрушениями горных пород, а также заполнением порового пространства флюидами различного происхождения. Перечисленные свойства среды влияют на размещение и локализацию рудных полей, как правило приуроченных к подобным зонам. Обработка данных выполняется с использованием разработанного специализированного программного комплекса StreamSDS.

Гетерогенность земной коры и ее отображение в сверхглубинном сейсмическом разрезе МОВ-ОГТ

Итоговую трассу ОГТ можно рассматривать как результат глубинного сейсмического зондирования земной коры в «ближней» зоне, когда неоднородности среды облучаются относительно узким «пучком» волнового поля [Караев, Рабинович, 2000. С. 98–99]. В соответствии с увеличением радиуса Френеля $r_{Фр} = (\lambda H/2)^{1/2}$ с глубиной изменяется масштаб сейсмической неоднородности. Так, крупномасштабные блоки в верхней части коры при сохранении их абсолютных размеров на больших глубинах рассматриваются в качестве средне- и даже мелкомасштабных рассеивающих неоднородностей. На больших глубинах абсолютные размеры мелкомасштабных неоднородностей могут достигать 1 км и более. Они формируют статистический «фон» волнового поля, контрастность которого обусловлена действием современных глубинных процессов в Земле, определяющих физическое состояние пород вещества в результате влияния давлений и температур.

Действительно, полученные в последнее время многочисленные данные сверхглубинного ОГТ (СГ-ОГТ) подтвердили отличное от горизонтально слоистого строение земной коры. На разрезах СГ-ОГТ не установлено отражающих границ, расположенных ниже 4–5 с и имеющих региональную протяженность. Наблюдаются лишь многочисленные отражающие площадки, соизмеримые с первой зоной Френеля. Они образуют вертикально и латерально неоднородные зоны насыщения коры отражающими элементами. Установлено также, что имеются сильные флуктуации как амплитуд, так и времен вступления сейсмических P -волн. Стало очевидным, что традиционная слоистая сейсмическая модель земной коры не может быть принята за основу при обработке и интерпретации сейсмических наблюдений в «ближней» зоне.

В настоящее время в основу обработки сверхглубинных сейсмических данных ОГТ закладывается гетерогенная сейсмическая модель земной коры. Идея сейсмической гетерогенности состоит в том, что формирование волновых пакетов и их интенсивность определяются отражательной способностью разномасштабных неоднородностей, а не отдельных точечных отражателей в земной коре. Когда размеры локальной неоднородности a становятся значительно меньшими, чем длина волны λ , мы можем пренебречь ими и заменить такую неоднородную среду эквивалентной однородной средой. Характеристики такой эквивалентной однородной среды называют «эффективными».

Особые сложности возникают тогда, когда длина пройденного пути волны в неоднородной среде L превышает длину волны λ и характерный размер локальной неоднородности a . Чем больше величины L/λ и L/a , тем труднее рассматривать такую задачу в рамках детерминированного подхода. По опыту обработки глубинных разрезов ОГТ на опорных сейсмических профилях можно дать оценку длины пройденного пути волны (L) в несколько десятков километров, а характерного размера локальных неоднородностей (a) в первые километры, при этом длина волны (λ) заключена в пределах 50–750 метров. В этом случае величины

$$\frac{L}{\lambda} = \frac{10000}{100} = 100 \text{ и } \frac{L}{a} = \frac{10000}{1000} = 10$$

оказываются существенно большими. Поэтому, для описания неоднородных объектов на большой глубине полезным оказывается статистический подход, дающий усредненные характеристики объектов земной коры.

В общем виде сейсмическую гетерогенность земной коры следует рассматривать как сочетание локальных мелкомасштабных неоднородностей a , собранных в определенные композиции, различающиеся масштабом и структурой организации, контрастностью и плотностью распределения неоднородностей. При взаимодействии излучаемой волны λ с гетерогенной геологической средой образуются различные типы волн в зависимости от структуры среды. Если размер локальной неоднородности много больше длины волны ($a \gg \lambda$), то наблюдаются отражения зеркального типа, как отражения в слоистой среде. Если размер локальной неоднородности соизмерим с длиной волны ($a \approx \lambda$), то возникают дифрагированные волны. Если размер локальной неоднородности много меньше длины волны ($a \ll \lambda$), то возникают рассеянные волны. Геологической содержательностью обладают интегральные характеристики такого трехкомпонентного волнового поля.

Далее в настоящей работе рассмотрен алгоритм и предложена вычислительная технология получения динамических, в частности спектральных и энергетических, характеристик сейсмических волн на основе получения и последующего использования локальной формы волнового пакета. Под локальным волновым пакетом авторы понимают неразделимую интерференцию отраженных, дифрагированных, рассеянных волн, формирующуюся на неоднородном объекте земной коры, имеющую начало и конец на сейсмической трассе и обладающую устойчивой (повторяющейся) формой для данного объекта.

Специализированный программный комплекс StreamSDS вычисляет форму сложного отражения, сформированного в области локальной неоднородности сейсмического разреза. Он позволяет исследовать один из наиболее важных динамических эффектов в условиях сложных гетерогенных типов сред, мало различающихся по скоростям, – эффект поглощения энергии отраженных волн, проявляющийся в аномальном затухании амплитуд на средних и высоких частотах. Эта характеристика гетерогенной среды связана с важными параметрами прогноза полезных ископаемых на больших глубинах: повышенной трещиноватостью, разломами и разрушениями, а также заполнением порового пространства флюидами различного происхождения.

Алгоритм вычисления локальной формы волнового пакета на разрезе ОГТ

При изучении глубинных разрезов ОГТ, полученных в условиях сложнопостроенных гетерогенных сред, сейсмическая трасса состоит из интерференционных волновых пакетов, являющихся результатом отражения, дифракции и рассеяния волн на локальных неоднородных объектах геологической среды. Волновой пакет $S_n(t)$ формируется в пределах некоторой области D гетерогенной среды, имеющей характерный размер локальной неоднородности a . Форма волнового пакета $S_n(t)$ зависит от эффективной импульсной реакции среды $K_n(t)$ в пределах области неоднородности и формы зондирующего импульса $S_0(t)$: $S_n(t) = S_0(t) * K_n(t)$.

Разработанный алгоритм определения локальной формы волнового пакета $S_n(t)$ основан на осреднении волновых пакетов в пределах некоторого окна на временном разрезе ОГТ. Размеры окна равняются размеру области локальной неоднородности a гетерогенной среды, а шаг смещения окна по профилю диктуется требованием гладкости изменения формы волнового пакета. Таким образом, в каждом окне на разрезе ОГТ вычисляется уникальная форма волнового пакета, которая может быть использована затем для вычисления динамических характеристик в пределах некоторой области D временного сейсмического разреза, размеры которой соответствуют характерному размеру изучаемых неоднородных объектов.

Выделение волновых пакетов на сейсмической трассе ОГТ производится по максимумам огибающей модуля трассы. Локальные максимумы огибающей кривой соответствуют максимальным амплитудам отдельных волновых пакетов (их отдельность обеспечивается наличием окрестности у каждого локального максимума). Суммирование участков трасс в пределах этих окрестностей позволяет получить характерную форму локального волнового пакета. Алгоритмом предусмотрено, что окно для вычислений с размером, равным характерному размеру локальной неоднородности гетерогенной среды, впоследствии пробегает весь разрез, тем самым позволяя получить множество локальных волновых пакетов и изучить их изменения. Вычисление динамических, в частности спектральных и энергетических, характеристик

локальных волновых пакетов предоставляет количественные данные о свойствах объектов геологической среды в пределах всего сейсмического разреза.

Определение локальной формы волновых пакетов осуществляют в следующей последовательности.

1. Глубинные сейсмические данные представляют в виде стандартного временного сейсмического разреза.

2. По полученному сейсмическому разрезу определяют характерный размер локальных неоднородностей гетерогенной геологической среды a , который выражают в координатах сейсмического времени t_0 (мс) и протяженности x_0 (м).

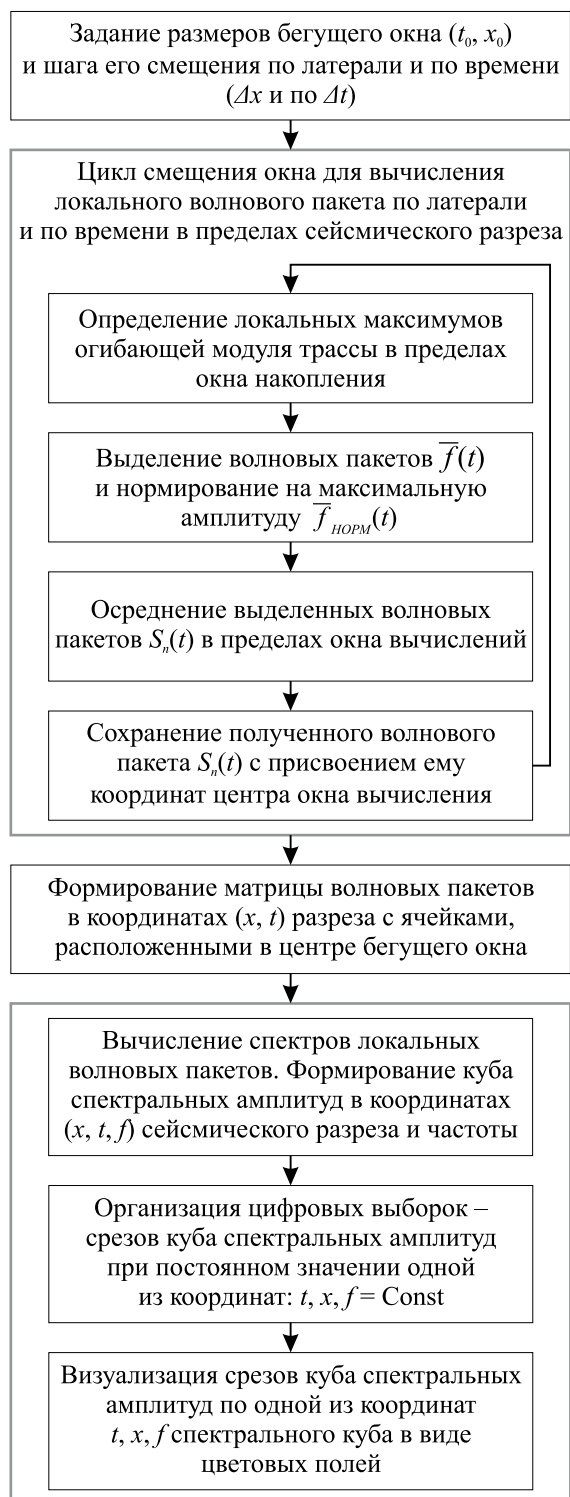


Рис. 1. Алгоритм определения локальной формы пакета отраженных, дифрагированных и рассеянных волн в скользящем окне на сейсмическом разрезе МОВ-ОГТ и вычисления куба амплитудных спектров

3. В соответствии с выбранными размерами (t_0, x_0) задают размеры «бегущего» окна для вычисления локального пакета отраженных волн. Для перемещения окна вычислений по сейсмическому разрезу задают шаг смещения окна по времени: Δt , и по профилю: Δx , причем $0 < \Delta t < t$ и $0 < \Delta x < x$, т. е. смещение окна осуществляют с перекрытием положения или без него.

4. В пределах выбранного окна при каждом его фиксированном положении на сейсмическом разрезе в соответствии с описанным ниже алгоритмом вычисляют локальную форму отраженного волнового пакета.

5. В цикле смещения указанного окна по латерали и по времени в пределах сейсмического разреза формируют матрицу локальных волновых пакетов.

6. Для каждого локального волнового пакета вычисляется амплитудный спектр, который помещается в спектральный куб данных с координатами сейсмического времени, протяженности разреза и частоты (t, x, f) .

Разработанный алгоритм определения локальной формы волновых пакетов (рис. 1) основан на синфазном суммировании отдельных волновых пакетов $\bar{f}(t)$, выявленных в пределах участка сейсмического разреза (окна размером (t_0, x_0) , соответствующего области D неоднородности с характерным размером a , которая служит объектом геологического интереса. Алгоритм исключает зависимость полученной итоговой формы волнового пакета $S_n(t)$ от взаимного геометрического расположения отдельных волновых пакетов $\bar{f}(t)$ в пределах фрагментов трасс $f(t)$ сейсмического разреза, так как все волновые пакеты $\bar{f}(t)$ суммируются синфазно.

В качестве точек синфазного суммирования t_i волновых пакетов $\bar{f}(t)$ во фрагменте сейсмической трассы $f(t)$ выбирают положения максимумов огибающей модуля сейсмической трассы $|f(t)|$: $\{t_i : |f(t_i)| \rightarrow \max\}$.

Локальные максимумы огибающей соответствуют максимальным амплитудам отдельных волновых пакетов. Их разделение обеспечивается наличием окрестности у каждого локального максимума. Временная длительность волнового пакета $\bar{f}(t)$ задается окрестностью, которая окружает точку суммирования t_i в равных или неравных пропорциях: $(t_i - \varepsilon_1; t_i + \varepsilon_2)$, где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – радиусы окрестности.

Выделенный волновой пакет $\bar{f}(t)$ нормируется на максимальную амплитуду

$$\bar{f}_{НОРМ}(t) = \frac{\bar{f}(t)}{\max \bar{f}(t)},$$

где $t \in (t_i - \varepsilon_1; t_i + \varepsilon_2)$.

Суммирование полученных таким образом волновых пакетов в пределах окна для вычислений позволяет получить устойчивую осредненную форму отраженного волнового пакета на локальном участке сейсмического разреза. Поэтому в способе производят осреднение волновых пакетов

$$S_n(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{f}_{НОРМ}(t),$$

где n – количество волновых пакетов в пределах окна вычислений.

Далее в цикле осуществляется смещение окна вычисления локальной формы волнового пакета с шагом Δx по координате x и Δt по времени t вдоль сейсмического разреза с перекрытием или без него. Размер шагов смещения окна задается с учетом обеспечения необходимой гладкости изменения формы локального волнового пакета. Матрица локальных волновых пакетов организуется так, что каждый локальный волновой пакет в ней занимает место соответственно своему положению на сейсмическом разрезе.

По полученным цифровым данным о форме локальных волновых пакетов в пределах всего глубинного сейсмического разреза по соответствующим методикам определяют динамические характеристики отраженных волн, сформированных на неоднородных объектах гетерогенной среды.

Следует заметить, что в системе РЕАПАК [Рудницкая и др., 1983] реализован и используется способ определения формы элементарного сигнала, как регулярной части накопленного волнового пакета. Способ позволяет оценить форму сигнала по временному разрезу ОГТ с помощью суммирования волновых пакетов, выделенных на трассах ОГТ. Выделение момента вступления волнового пакета на сейсмической трассе производится по признаку максимального роста амплитуд трассы. Основанием для выделения момента вступления одиночного сейсмического сигнала или целого волнового пакета является тот факт, что сейсмический сигнал характеризуется плавным нарастанием первого отклонения, т. е. начальная скорость смещения частиц среды равна нулю, а ускорение или производные от смещения еще более высокого порядка претерпевают скачок [Берзон и др., 1962]. Далее в этом способе волновые пакеты совмещаются своими начальными точками и умножаются на множители, которые выбираются из условия совпадения полярности и амплитуд первого экстремума. Оценка формы элементарного сигнала получается в результате суммирования трансформированных таким образом волновых пакетов.

Однако способ определения формы элементарного сигнала в системе РЕАПАК обладает рядом ограничений. Выявление начальной части сигнала по критерию максимального градиента амплитуд трассы оправданно лишь для сигналов, близких к минимально-фазовым. Для сигналов других типов, например симметричных (нульфазовых) или произвольной формы, такой способ может привести к ошибкам в оценке фазовой характеристики сигнала и, следовательно, к ошибкам в определении момента и амплитуды вступления волны [Кондратьев и др., 1990]. Другим ограничением, которое становится весьма существенным при обработке сверхглубинных сейсмических разрезов ОГТ по опорным или региональным профилям в системе РЕАПАК, является неизменность формы элементарного сигнала, применяемого для вычисления разреза эффективных коэффициентов отражения, что не отвечает действительности для сейсмических разрезов протяженностью в тысячи и глубиной до сотни километров.

К преимуществам предложенного в настоящей работе алгоритма вычисления формы локальных волновых пакетов можно отнести следующие:

- метод статистического осреднения подчеркивает общие черты в форме локальных отражений, генерируемых малой областью гетерогенной среды, и хорошо подавляет ее случайные флуктуации. Чувствительность в определении формы локальных волновых пакетов зависит от минимально возможного размера окна для вычислений, которое, как показывает опыт, должно обеспечивать около ста суммирований для получения статистически устойчивой локальной формы волнового пакета;

- алгоритм позволяет получать произвольную форму волнового пакета – как симметричную, так и антисимметричную. Заметим также, что алгоритм исключает зависимость осредненной формы волнового пакета $S_n(t)$ от взаимного геометрического расположения отдельных волновых пакетов в пределах области неоднородности D , так как все они суммируются синфазно;

- алгоритм позволяет вычислить локальную форму отраженной волны в пределах некоторой области D разреза ОГТ и по ее спектральным и энергетическим характеристикам судить об отражающих свойствах гетерогенной среды в пределах области неоднородности на разрезе ОГТ;

- традиционным динамическим параметром в сейсмических исследованиях является разрез мгновенных амплитуд, дающий характеристику отражения в каждой точке разреза ОГТ [Бельфер и др., 1986]. К недостаткам этого параметра можно отнести чувствительность к шумам и случайным флуктуациям в сейсмических данных. В рамках же предложенного статистического алгоритма накопления формы отраженной волны вычисляется более устойчивая амплитудно-частотная характеристика отражающих свойств среды на данном участке профиля за счет статистического суммирования волновых пакетов в пределах окна. Для сейсмических опорных профилей, преследующих цель регионального и глубинного изучения строения всей консолидированной земной коры, статистическое осреднение и на этой основе разделение геологической среды на блоки является адекватным подходом.

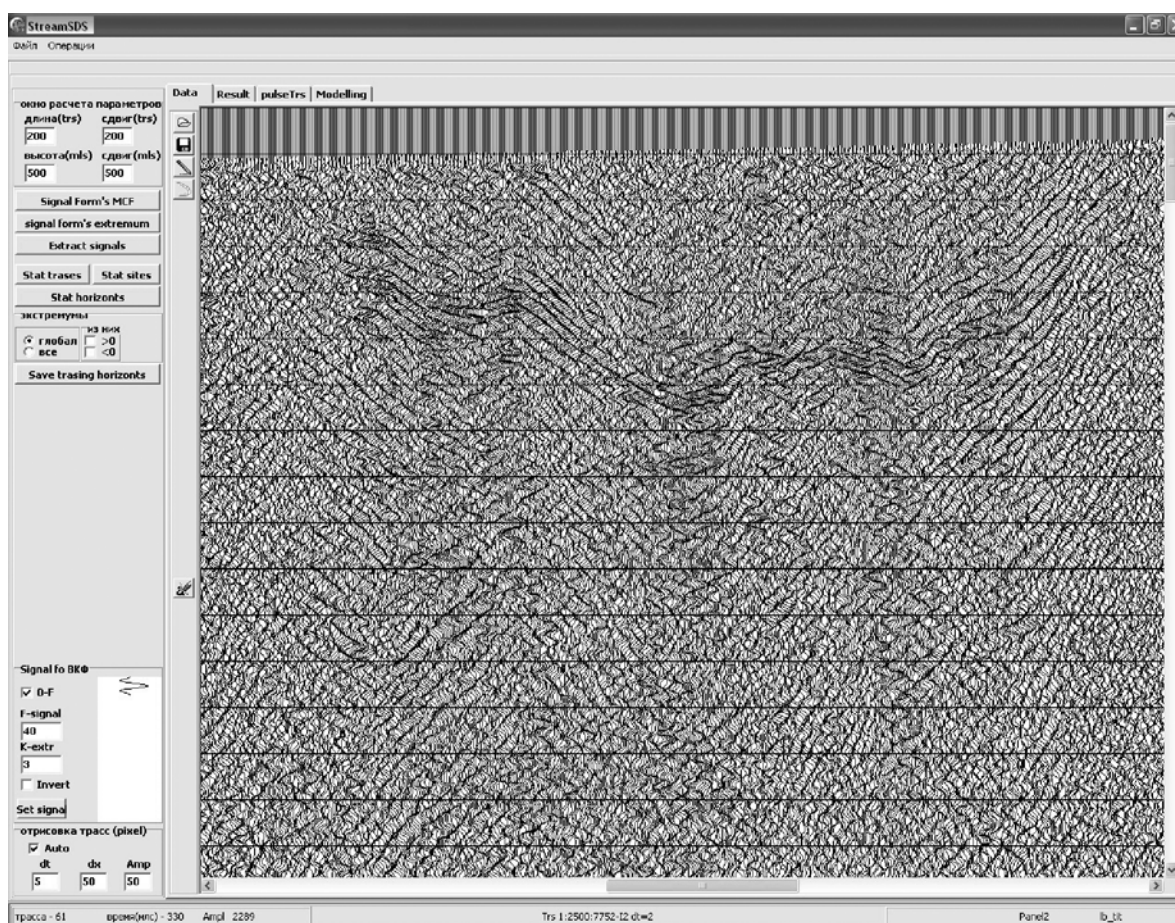


Рис. 2. Фрагмент сверхглубинного сейсмического разреза ОГТ профиля-рассечки «Алтай – Северная Земля» с выбором параметров, задающих размер окна для вычисления локального волнового пакета

Применение разработанного алгоритма на сверхглубинном опорном профиле-рассечке «Алтай – Северная Земля»

Разрез сверхглубинного опорного профиля-рассечки «Алтай – Северная Земля» был загружен в рабочую область программного комплекса StreamSDS и разделен на участки, соизмеримые со средним размером неоднородности 200 трасс * 500 мс (рис. 2).

На каждом из участков с помощью разработанного алгоритма в режиме «бегущего окна» со сдвигом без перекрытия получены волновые пакеты $S_n(t)$. При визуальном сравнении форм локальных волновых пакетов можно отметить их подобие. В каждом волновом пакете выделяется три части колебательного процесса: вступительная часть длительностью от 0 до 30–40 мс, основная часть в интервале от 30–40 до 70–80 мс и затухающая часть на временах более 80 мс (рис. 3).

Несмотря на общие черты, замеченные при визуальном сравнении форм локальных волновых пакетов, их амплитудные спектры фиксируют значительные отличия, особенно в области средних и высоких частот, расположенных правее главного максимума (рис. 4).

Вычислительная технология диагностики зон затухания энергии отраженных волн по глубинным разрезам ОГТ на опорных профилях

На основе алгоритма определения локальной формы волнового пакета разработана вычислительная технология диагностики зон затухания энергии отраженных волн. Она позволяет получать и привлекать к интерпретации в условиях сложных гетерогенных типов сред, мало отличающихся по скоростям, динамические характеристики сейсмических волн, более уверенно дифференцирующие среду: особенности локальной формы волнового пакета, его амплитудно-частотный спектр. Анализ спектров волновых пакетов позволяет обнаружить эффекты, связанные с нелинейным затуханием амплитуд, отличным от экспоненциального,

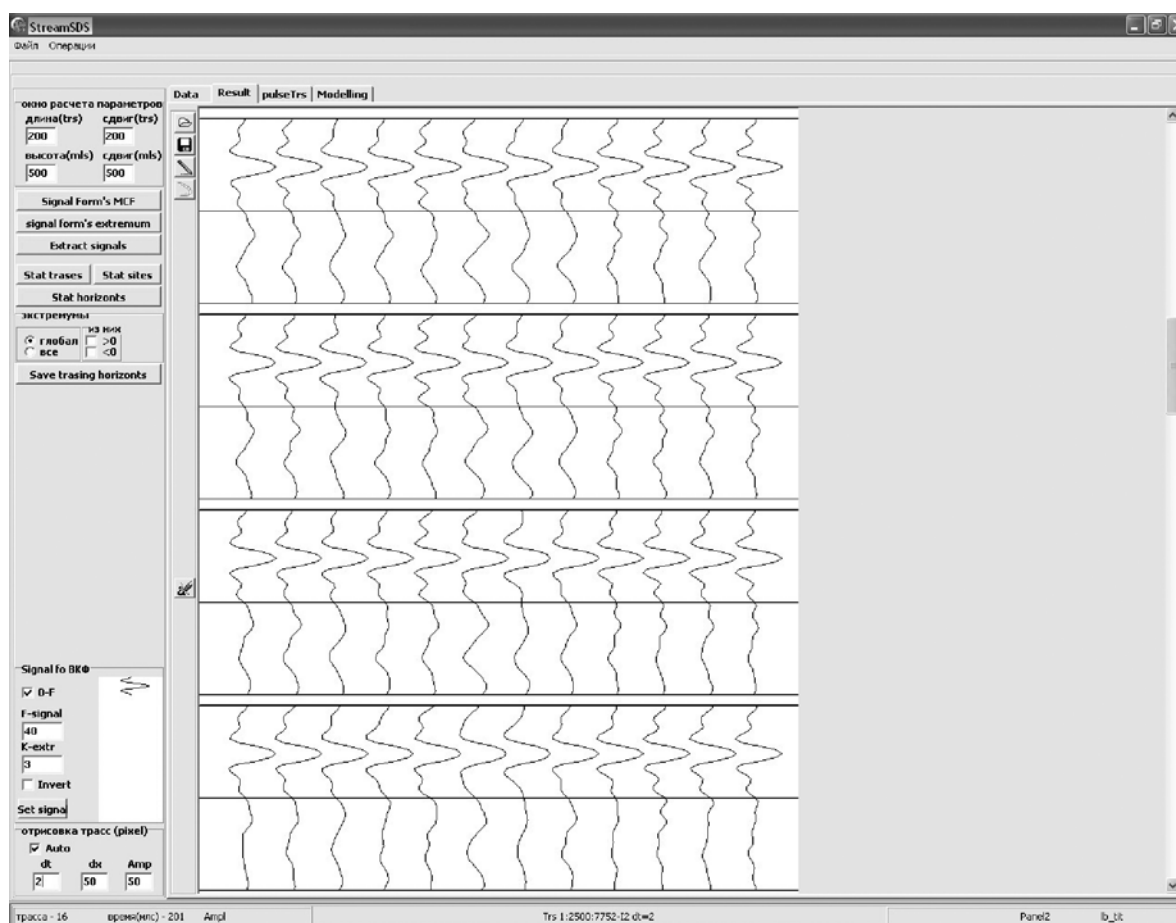


Рис. 3. Матрица локальных пакетов отраженных, дифрагированных и рассеянных волн, вычисленная в режиме скользящего окна на разрезе ОГТ профиля-рассечки «Алтай – Северная Земля»

а также поглощением высоких частот, рассеянием и другими потерями энергии при прохождении сейсмического импульса в толще пород.

Известно, что горные породы ведут себя как низкочастотный фильтр, пропуская низкие частоты почти без искажения, но отфильтровывая высокие частоты [Янг, Хилл, 1986]. Реальный спектр ведет себя сложным образом, поскольку разрушенная порода действует как цепочка фильтров, подавляя в спектре регистрируемого сигнала различные частотные компоненты. Можно отметить, что затухание редко линейно зависит от частоты, как было бы в случае, если бы оно целиком определялось эффектами поглощения энергии в горных породах. Неоднородность строения изучаемых горных пород приводит к преимущественному затуханию на некоторых частотах, вызванному эффектами рассеяния энергии сейсмических волн на малых неоднородностях среды. Это явление искажает нормальную картину роста затухания с частотой, что и наблюдается на реальных спектрах. Многие исследователи [Аки, Ричардс, 1983; Берзон и др., 1962; Караев, Рабинович, 2003; Кузнецов и др., 2004] считают, что затухание является гораздо более чувствительным параметром, характеризующим свойства неоднородных горных пород, чем скорость сейсмических волн.

Специализированный программный комплекс StreamSDS вычисляет матрицу локальных волновых пакетов с помощью «бегущего окна», передвигающегося по сейсмическому разрезу с перекрытием окон или без него. Далее программный комплекс формирует куб спектральных амплитуд волновых пакетов в пространстве временной и латеральной координат сейсмического профиля и частоты (t, x, f) . Для удобства анализа и выявления аномалий поля спектральных амплитуд технология комплекса позволяет формировать и визуализировать срезы спектрального куба по любой из координат: временной ($t = \text{Const}$), латеральной ($x = \text{Const}$) и по частоте ($f = \text{Const}$).

Разработанная технология диагностики зон затухания энергии отраженных волн была применена на опорном профиле-рассечке «Алтай – Северная Земля», расположенном в зоне Байкитской антеклизы Восточной Сибири и имеющем протяженность 300 км. Предваритель-

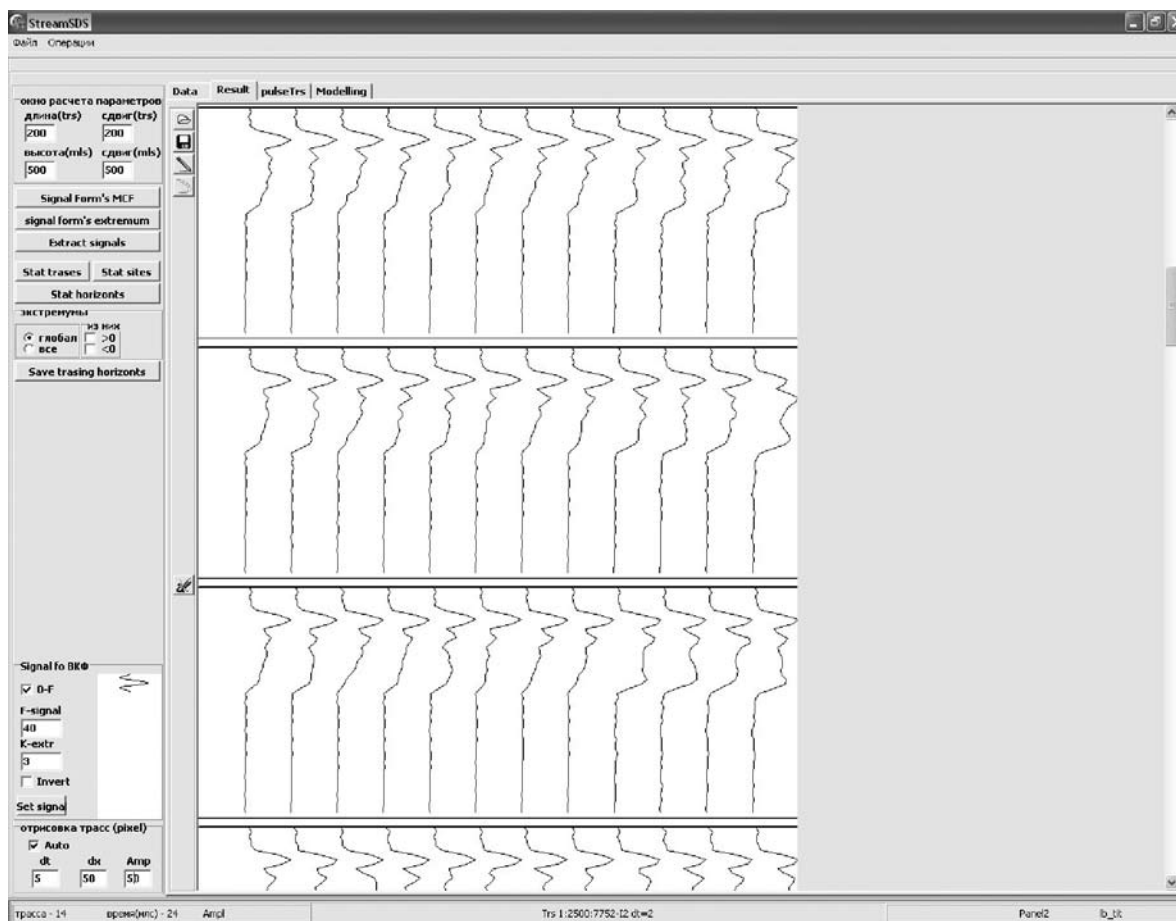


Рис. 4. Амплитудные спектры локальных волновых пакетов

ная геолого-тектоническая модель строения земной коры, составленная по профилю-рассечке «Алтай – Северная Земля», нанесена на полученный срез спектрального куба (рис. 5). Анализ этого среза позволяет разделить всю земную кору до мантии на два крупных блока с разным строением.

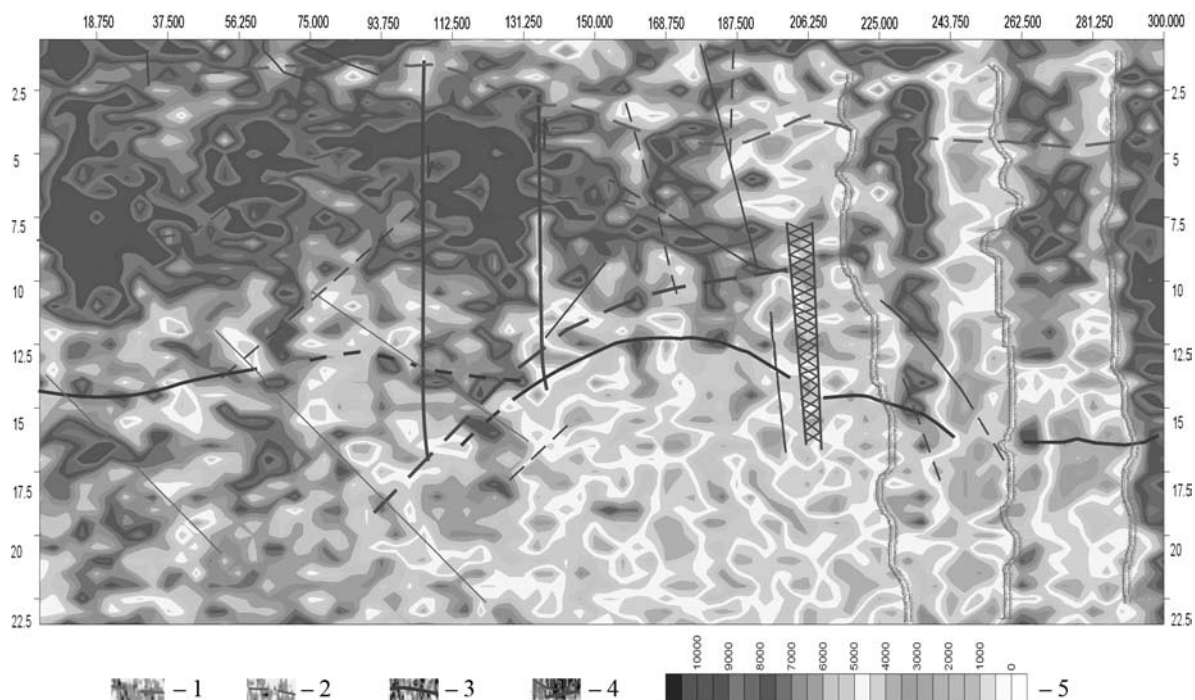


Рис. 5. Срез спектрального куба амплитудных спектров локальных волновых пакетов в интервале частот правее максимума по профилю-рассечке «Алтай – Северная Земля»

Условные обозначения: 1 – кровля фундамента; 2 – кровля гранулитово-базитового слоя земной коры; 3 – граница Мохоровичича; 4 – глубинные разломы; 5 – суммарные значения амплитуд в интервале средних и высоких частот правее максимума

Первый блок прослеживается от начала и до 160 км профиля и приурочен к Байкитской антеклизе. Верхний осадочный слой отделен от нижележащих толщ кровлей фундамента. На спектральном срезе границу фундамента сопровождает полоса пониженных значений амплитуд спектра. Значения амплитуд понижаются до 600 условных единиц против 900–1 000 у. е. в верхнем осадочном слое. Средняя кора представлена гранито-гнейсовым слоем, являющимся верхней частью консолидированной земной коры. Этот слой насыщен высокими значениями амплитуд отражений (800–1 000 у. е.), расположенными во временном интервале от 3 до 10 с. Ниже по разрезу расположен гранулитово-базитовый слой, заканчивающийся границей «Мохо» на глубине 13,0–13,5 с. Он характеризуется существенным поглощением амплитуд на средних и высоких частотах спектров отраженных волновых пакетов. Среднее значение спектральных амплитуд в этом слое 500–700 у. е. К нижнему слою консолидированной земной коры из мантии наклонно протягиваются и прорезают границу «Мохо» прерывистые линии аномально высокого поглощения амплитуд, характеризующиеся значениями 200–500 у. е. Вероятно, эти линии трассируют плоскости глубинных разломов, вдоль которых происходили движения блоков земной коры относительно друг друга.

Второй блок начинается от 160 км и продолжается до окончания разреза. Он представлен Иркиннеево-Чадобецким авлакогеном с пологим куполообразным поднятием в осадочном чехле. Для этого блока характерен совсем другой тип спектрального поля, который нельзя разделить на слои. В районе Чадобецкого поднятия, приуроченного к 180–220 км профиля, наблюдается чередование вертикальных «каналов» шириной до 30 км, отличающихся значительной разницей в спектральных амплитудах: от 200 до 1 000 у. е. Эффект аномального поглощения амплитуд (до уровня 200–500 у. е.) в трех проявляющихся каналах может быть

обусловлен водо-газонасыщенными термальными флюидопотоками, меняющими структуру горных пород. Что подтверждают независимые геологические сведения о нестабильной тектоно-магматической обстановке в этой зоне. На «стыке» блоков (от 130 до 200 км профиля) по всей глубине кора претерпела многочисленные деформации и подвижки, что явилось результатом ее напряженного состояния в этой части. Очевидно, здесь проходит мощная зона сжатия, причем наиболее жесткий блок Байкитской антеклизы как бы расклинивает подвижную кору авлакогена, контактируя с последним по пологим глубинным надвигам. Коллизия проявляется также в выгнутой вверх форме границы «Мохо», испытывающей разрывы и значительные смещения по вертикали.

Результатами сейсморазведочных работ и обобщающими геологическими исследованиями последних лет доказана принципиальная возможность открытия промышленных углеводородных (УВ) скоплений на больших глубинах (более 4–5 км), в том числе значительных по запасам [Максимов и др., 1988]. Дальнейшая задача прогноза и поисков глубоководных УВ зависит от степени изученности условий и факторов формирования и размещения таких объектов. В этой связи проблема выявления особенностей строения земной коры, тектонических обстановок в ее глубоких частях, влияющих на формирование залежей УВ на больших глубинах, приобретает особую актуальность.

Задачей динамического анализа отраженных волн в сейсморазведке является разработка численных алгоритмов диагностики нелинейных особенностей волновых полей, которые не могут быть объяснены с прежних позиций линейной теории упругости [Пузырев, 1997]. В частности, большое практическое значение имеет задача выявления эффектов нелинейного затухания отраженных волн, проявляющихся на высоких частотах.

Разработана технология диагностики эффектов нелинейного затухания амплитуд отраженных волн в области высоких частот на основе срезов спектрального куба по частоте. Вычисления, проведенные на опорном сейсмическом профиле ОГТ с помощью разработанного специализированного программного комплекса, показывают адекватные (с точки зрения известных геологических фактов) результаты. Получены новые данные о строении среды на больших глубинах: выделены области повышенной трещиноватости, разломов и разрушений пород, а также зоны возможного заполнения порового пространства флюидами. Перечисленные объекты представляют интерес для поиска месторождений горючих полезных ископаемых и рудных полей, как правило, приуроченных к зонам разломов, зонам повышенной трещиноватости пород, интрузивным образованиям.

Список литературы

- Аки К., Ричардс П.* Количественная сейсмология. М.: Мир, 1983. Т. 1, 2.
- Алексеев А. С., Цибульчик Г. М.* Математические модели сейсморазведки. Актуальные проблемы вычислительной математики и математического моделирования. Новосибирск: Наука, 1985. 265 с.
- Бельфер И. К., Погосев В. М., Тяпкин Ю. К. и др.* Оценка возможностей использования мгновенных динамических характеристик сейсмических записей при поисках нефти и газа // Обзор ВИЭМС: Разведочная геофизика. М., 1986. 76 с.
- Берзон И. С., Епинатьева А. М., Парийская Г. Н., Стародубровская С. П.* Динамические характеристики сейсмических волн в реальных средах. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 511 с.
- Зеркаль С. М., Сонна М. С.* Локационные задачи теории распространения волн (дифракция и фокусировка). Новосибирск, 2003. 111 с.
- Караев Н. А., Рабинович Г. Я.* Рудная сейсморазведка. М.: Изд-во ЗАО «Геоинформмарк», 2000. 366 с.
- Кондратьев И. К., Киселев Ю. А., Ковригина Е. И., Крылов Д. Н.* Оценка точности и разрешающей способности используемых на практике способов решения обратной динамической задачи сейсморазведки // Обзор ВИЭМС: Региональная и морская геофизика. М., 1990. 41 с.
- Кузнецов О. Л., Чиркин И. А., Курьянов Г. В. и др.* Экспериментальные исследования. (Сейсмоакустика пористых и трещиноватых сред). М.: Гос. науч. центр РФ «ВНИИГеосистем», 2004. Т. 2. 361 с.

Максимов С. П., Лоджевская М. И., Самвелов Р. Г. и др. Геологические условия нефтегазонасыщенности на больших глубинах // Международный геологический конгресс, XXVIII сессия: Докл. сов. геологов. М.: Наука, 1988. 231 с.

Пузырев Н. Н. Методы и объекты сейсмических исследований (введение в общую сейсмологию). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 300 с.

Рудницкая Д. И., Берилко В. И., Горохова Т. А. и др. Методические рекомендации по обработке сейсмических записей при изучении акустических неоднородностей тонкослоистых сред с целью прогнозирования неантиклинальных ловушек нефти и газа. Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 1983. 59 с.

Янг Р. П., Хилл Дж. Дж. Статистический анализ спектров сейсмических записей с целью определения свойств горных пород // Анализ и выделение сейсмических сигналов / Пер с англ. / Под ред. Ч. Чжэня. М.: Мир, 1986. 235 с.

Материал поступил в редколлегию 2.10.2006