

«ГСК-СЕЙСМОМОДЕЛИРОВАНИЕ» - программа моделирования 3-D сейсмических данных в приближении Кирхгофа

■ Закариев Ю.Ш., Казаков А.К., Плешкевич А.Л., ЗАО ГСК, г. Москва.

Аннотация. Рассмотрены теоретические основы, алгоритм и результаты моделирования 3-D сейсмограмм и временных разрезов в акустическом приближении Кирхгофа для среднескоростной модели среды. Помимо однократных отражений от границ сложной формы предусмотрено моделирование поверхностных волн и волн первых вступлений. Создана быстродействующая программа с развитым интерфейсом для широкого использования на Windows-PC и ноутбуках.

Ключевые слова: 3-D сейсмическое моделирование, приближение Кирхгофа, быстродействующая программа для PC.

Введение

Популярные алгоритмы моделирования сейсмических данных основаны либо на крайне упрощенной модели, связанной с представлениями об отражении от непрерывных гладких границ и локальном переносе сейсмического сигнала заданной формы вдоль лучей (с возможным учетом геометрического расхождения), либо на затратных в вычислительном отношении сеточных алгоритмах, связанных с решением волновых уравнений в рамках акустической либо упругой моделей земной среды [3, 8, 9]. Основным недостатком алгоритмов первого типа является их неспособность описывать дифракцию, рассеяние и фокусировку волн в областях каустик для сред с нерегулярной и сложной формой отражающих границ, что резко снижает качество и адекватность результатов такого моделирования. Сеточные алгоритмы моделирования на основе решения 3-D скалярного волнового уравнения либо системы уравнений динамической теории упругости связаны с большим объемом расчетов и в случае моделирования 3-D сейсмических данных для систем наблюдений многократных перекрытий требуют использования суперкомпьютерных мощностей. Еще

более важным затрудняющим обстоятельством их использования является то, что применение сеточных алгоритмов требует создания подробной сейсмогеологической модели интересующего объекта разведки с привлечением коротажных данных и результатов комплексной геолого-геофизической интерпретации. Это существенно сужает область возможного применения сеточных методов волнового 3-D моделирования или делает его невозможным в тех случаях, когда апробированная сеточная модель среды отсутствует, что характерно для ранних этапов проведения сейсморазведочных работ. В этом случае хорошей альтернативой может стать использование алгоритмов сейсмического моделирования в приближении Кирхгофа [1] для среднескоростной модели земной среды. Такой метод моделирования предъявляет минимальные требования к информации о модели среды, позволяя ограничиться заданием формы интересующих отражающих и рассеивающих сейсмических границ, распределением вдоль этих границ локальных коэффициентов отражения и средних скоростей волн в среде. Результаты такого моделирования адекватно учитывают эффекты геометрического

расхождения, дифракцию, рассеяние и фокусировку волн в областях каустик и, что немаловажно, могут быть оперативно получены при расчетах на обычных персональных компьютерах либо даже на портативных ноутбуках. Результаты моделирования могут использоваться на этапе проектирования сейсморазведочных работ при выборе и оптимизации параметров и методики сбора сейсмических данных, для априорной оценки разрешающей способности сейсмического метода в конкретном регионе проведения работ и возможности решения поставленных геологических задач, а также при тестировании процедур сейсмической обработки и планировании графов обработки и интерпретации. Область его допустимого применения соответствует области возможного применения популярных алгоритмов 3-D временной сейсмической миграции до суммирования, также использующих среднескоростную модель среды.

Основные математические соотношения

В рамках акустического приближения и среднескоростной модели среды запишем Фурье-преобразование по времени зондирующей волны от мгновенного точечного источника в виде модификации сферической волны:

$$G(\mathbf{r}|\mathbf{s};\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{s}|} \delta\left(t - \frac{|\mathbf{r}-\mathbf{s}|}{v}\right) e^{-i\omega t} dt = \frac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{s}|} e^{-i\omega \frac{|\mathbf{r}-\mathbf{s}|}{v}}, \quad (1)$$

где $\mathbf{s}$ – положение источника, $\mathbf{r}$ – точка среды, $v=v(\mathbf{r})$ – локальное значение средней скорости, t – время, ω – циклическая временная частота. При падении зондирующей волны (1) от источника на глубинную границу Γ :

$z=z(x,y)$ с локальным коэффициентом отражения $V=V(\mathbf{r})|_{\Gamma}$ в плоско-волновом приближении отраженная волна на границе Γ будет иметь вид: $u_0(\mathbf{r}|\mathbf{s};\omega)|_{\Gamma} = V(\mathbf{r})G(\mathbf{r}|\mathbf{s};\omega)|_{\Gamma}$. Будем интерпретировать ее как приближенное граничное условие Дирихле на границе Γ . Чтобы смоделировать отраженные и рассеянные волны, применим далее интегральную формулу волнового продолжения заданного граничного условия Дирихле [5] на поверхность наблюдения $z=0$ в приемники $\mathbf{g}$:

$$u_0(\mathbf{g}|\mathbf{s};\omega) \approx -\frac{1}{4\pi} \int_{\Gamma} u_0(\mathbf{r}|\mathbf{s};\omega) \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} G(\mathbf{g}|\mathbf{r};\omega) dS = -\frac{1}{4\pi} \int_{\Gamma} V(\mathbf{r})G(\mathbf{r}|\mathbf{s};\omega) \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} G(\mathbf{g}|\mathbf{r};\omega) dS, \quad (2)$$

где $\mathbf{n}$ – внешняя нормаль к границе Γ . Для моделирования желаемой угловой зависимости коэффициентов отражения можно дополнительно ввести зависимость коэффициента отражения $V=V(\mathbf{r}, \varphi)$ от величины угла φ рассеяния волн на элементарной площадке ΔS . Лучевое приближение $\omega \rightarrow \infty$ нормальной производной функции Грина имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} G(\mathbf{g}|\mathbf{r};\omega) = (\mathbf{n}, \nabla G(\mathbf{g}|\mathbf{r};\omega)) = \left(\mathbf{n}, \nabla \frac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{g}|} e^{-i\omega \frac{|\mathbf{r}-\mathbf{s}|}{v}} \right) \approx \frac{-i\omega}{|\mathbf{r}-\mathbf{g}|} \frac{\cos \varphi}{v} e^{-i\omega \frac{|\mathbf{r}-\mathbf{g}|}{v}}, \quad (3)$$

где φ – угол между единичной нормалью $\mathbf{n}$ к границе Γ в точке $\mathbf{r}$ и восходящим лучом к приемнику $\mathbf{g}$. С учетом лучевого приближения (3) перепишем (2) и затем выполним обратное преобразование Фурье для перехода из частотной области во временную. Получим:

$$u(\mathbf{g}|\mathbf{s},t) \approx c \frac{\partial}{\partial t} f(t) * \int_{\Gamma} \frac{V(\mathbf{r},\varphi)}{|\mathbf{r}-\mathbf{s}||\mathbf{r}-\mathbf{g}|} \frac{\cos \varphi}{v(\mathbf{r})} \delta\left(t - \frac{|\mathbf{r}-\mathbf{s}|+|\mathbf{r}-\mathbf{g}|}{v(\mathbf{r})}\right) dS, \quad (4)$$

где c – константа, которую далее можно выбрать произвольной, $*$ – знак операции свертки с заданным в источнике зондирующим сигналом $f(t)$. Интегральную формулу (4) удобно использовать для моделирования сначала «импульсных» сейсмических трасс, используя подходящую сеточную аппроксимацию дельта-функции под знаком интеграла и приближая интеграл суммой вкладов от элементарных площадок ΔS . При использовании в качестве зондирующего сигнала, например, импульса Риккера, выполняется свертка полученных импульсных трасс с заданным импульсоидом $f(t)$ и операция дифференцирования. Использование простейшей квадратурной формулы прямоугольников для вычисления интегралов вида (4) приводит к появлению специфических помех, напоминающих эффекты алейсинга пространственных частот, механизм появления которых подробно рассмотрен в работе [6] применительно к сейсмической миграции Кирхгофа, имеющей сходную структуру интегрального решения. Чтобы избежать появления этих помех, следует использовать квадратурные схемы с осреднением во временном окне [6]. В простейшем варианте использование этих схем применительно к (4) приводит к «размазыванию» сеточных дельта-функций в прямоугольники определенной ширины. После указанного осреднения выполняется суммирование вкладов от всех элементов ΔS отражающей или рассеивающей поверхности Γ в пределах заданной апертуры. Затем выполняется указанная свертка «импульсных» трасс с сигналом заданной формы и дифференцирование полученных сейсмических трасс по времени.

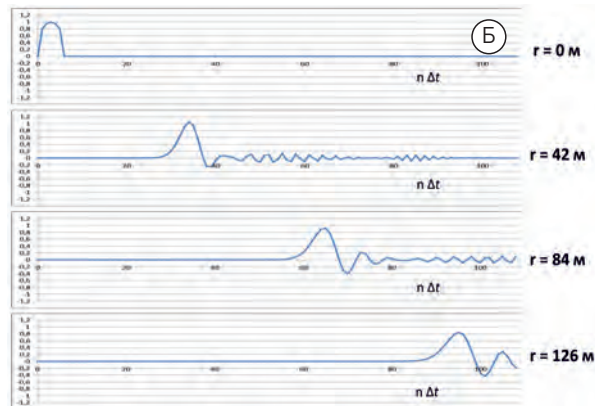
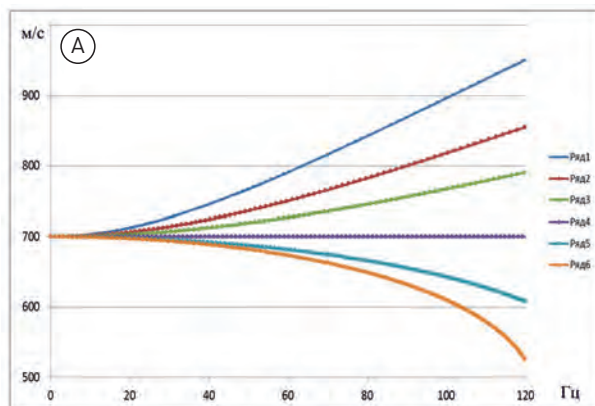
Опция моделирования поверхностных волн и волн первых вступлений

Характерной особенностью результатов полевой регистрации сейсмических волн является присутствие на сейсмограммах интенсивных низкоскоростных и низкочастотных волн-помех, отождествляемых с квази-рэлеевскими поверхностными волнами. Для моделирования этих волн необходимо использовать упругую модель среды и отвечающую ей систему динамических уравнений колебаний Ламе. В рамках акустического приближения и среднескоростной модели среды допустимо эвристическое имитационное моделирование конуса поверхностных волн, включая моделирование наблюдаемых эффектов их частотной дисперсии. Для этой цели было использовано решение дифференциального уравнения в частных производных вида:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + v_0 \frac{\partial u}{\partial r} - \varepsilon \frac{\partial^3 u}{\partial r^3} = 0, \quad (5)$$

где t – время наблюдения, r – расстояние от источника до приемника, v_0 – величина групповой скорости волн, ε – параметр, определяющий вид частотной дисперсии скоростей. На рис.1,а приведен вид зависимости фазовой скорости волн от частоты для набора параметров ε при групповой скорости $v_0=700$ м/с.

Дифференциальное уравнение (5) представляет собой запись первого дифференциального приближения для симметричной 4-точечной разностной схемы, предназначенной для решения одномерного уравнения переноса [4]. При этом величина параметра ε определяется соотношением шагов сетки Δt , Δr и параметром групповой скорости v_0 . Задав краевые условия в виде формы колебания при $r=0$ и нулевого начального условия, и выбрав желаемые величины



▲ Рис. 1. Моделирование диспергирующей поверхностной волны:
 а) зависимость фазовой скорости волн от частоты для набора параметров ε :
 Ряд 1 - $\varepsilon = 400$; Ряд 2 - $\varepsilon = 200$; Ряд 3 - $\varepsilon = 100$; Ряд 4 - $\varepsilon = 0$; Ряд 5 - $\varepsilon = -60$; Ряд 6 - $\varepsilon = -85$;
 б) результаты моделирования с параметрами $v_0 = 700$ м/с, $\varepsilon = -85$
 для набора удалений источник-приемник 0,42,84,126 (м); $\Delta t = 2$ мс.

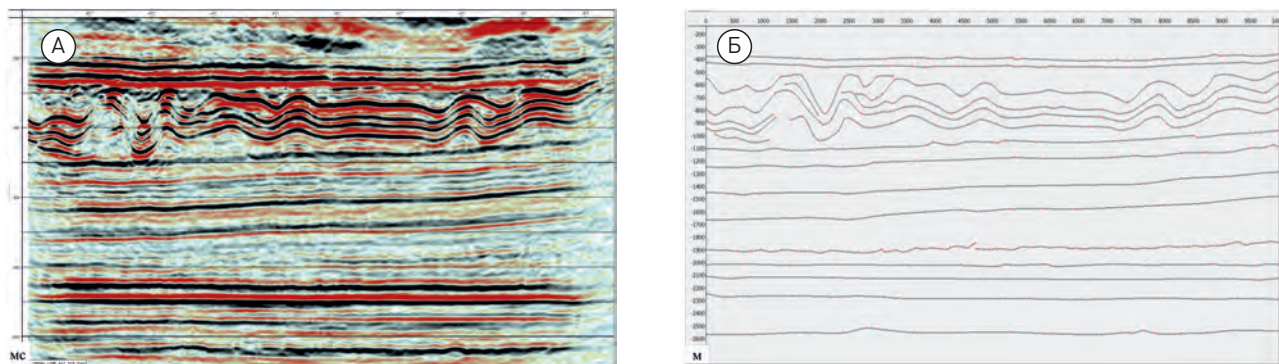
параметров v_0 и ε , а также шаг дискретизации Δt , можно однозначно определить величину шага сетки Δr . Далее, с помощью указанной разностной схемы можно получить решение в виде бегущей диспергирующей волны в заданном диапазоне удалений источник-приемник и времени наблюдения. Результаты моделирования поверхностной волны могут быть затем подsumмированы к результатам предшествующего моделирования сейсмограмм отраженных и рассеянных волн. Приведенный на рис.1,б пример с параметрами $v_0 = 700$ м/с, $\varepsilon = -85$ демонстрирует постепенное расплывание заданного при $r=0$ компактного сигнала в протяженный колебательный процесс с запаздыванием более высокочастотных компонент сигнала относительно низкочастотных.

Помимо поверхностных волн в рамках среднескоростной модели среды было также выполнено имитационное моделирование интенсивных волн 1-х вступлений - прямой и рефрагированной, времена вступления которых были определены как минимальные суммарные времена пробега от источника до произвольной глубинной точки среднескоростной модели среды и от глубинной

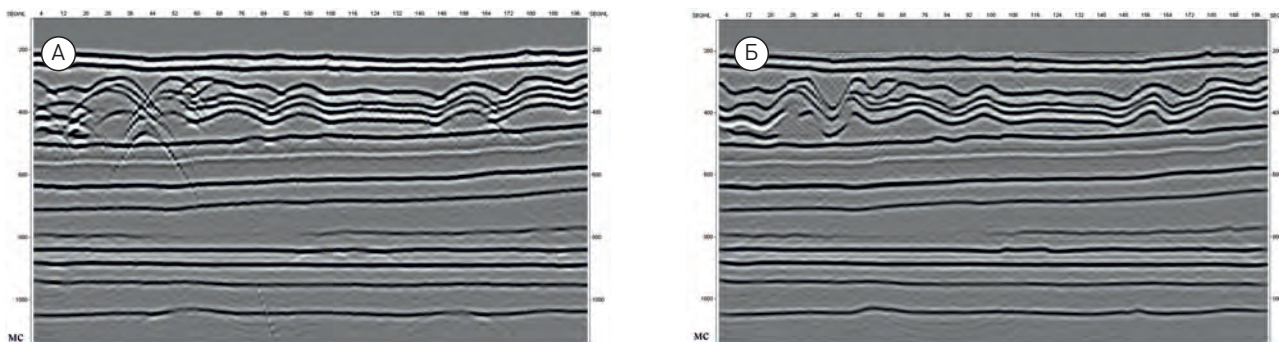
точки до приемника. Для этих волн был использован эвристический закон геометрического расхождения и желаемая величина их интенсивности.

Примеры результатов сейсмического моделирования

На следующих рисунках представлены примеры 3-D сейсмического моделирования для объекта, расположенного в Восточной Сибири. Вначале по имеющемуся реальному мигрированному временному разрезу (см. рис.2,а) были прослежены основные сейсмические горизонты. Используя далее известную зависимость времени пробега волн по вертикали от глубины, были рассчитаны средние скорости волн в среде, оценены глубины отражающих горизонтов и построена структурная глубинная модель, представленная на рис.2,б. Далее, отражающим горизонтам были приписаны локальные коэффициенты отражения, которые позволили на качественном уровне получить соответствие амплитуд синтетического временного разреза (рис.3,а) реальному временному разрезу (рис.2,а). Для проверки соответствия полученных результатов сейсмического моделирования была выполнена временная сейсми-



▲ Рис. 2. а) исходный временной мигрированный разрез; б) структурная модель.



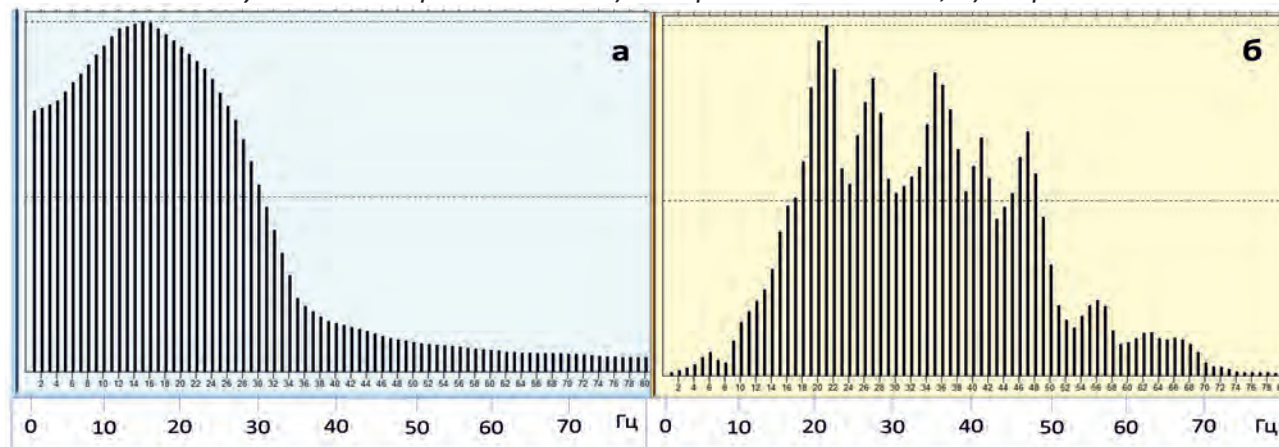
▲ Рис. 3. а) синтетический временной разрез нулевых удалений;
б) результат миграции Кирхгофа синтетического временного разреза.

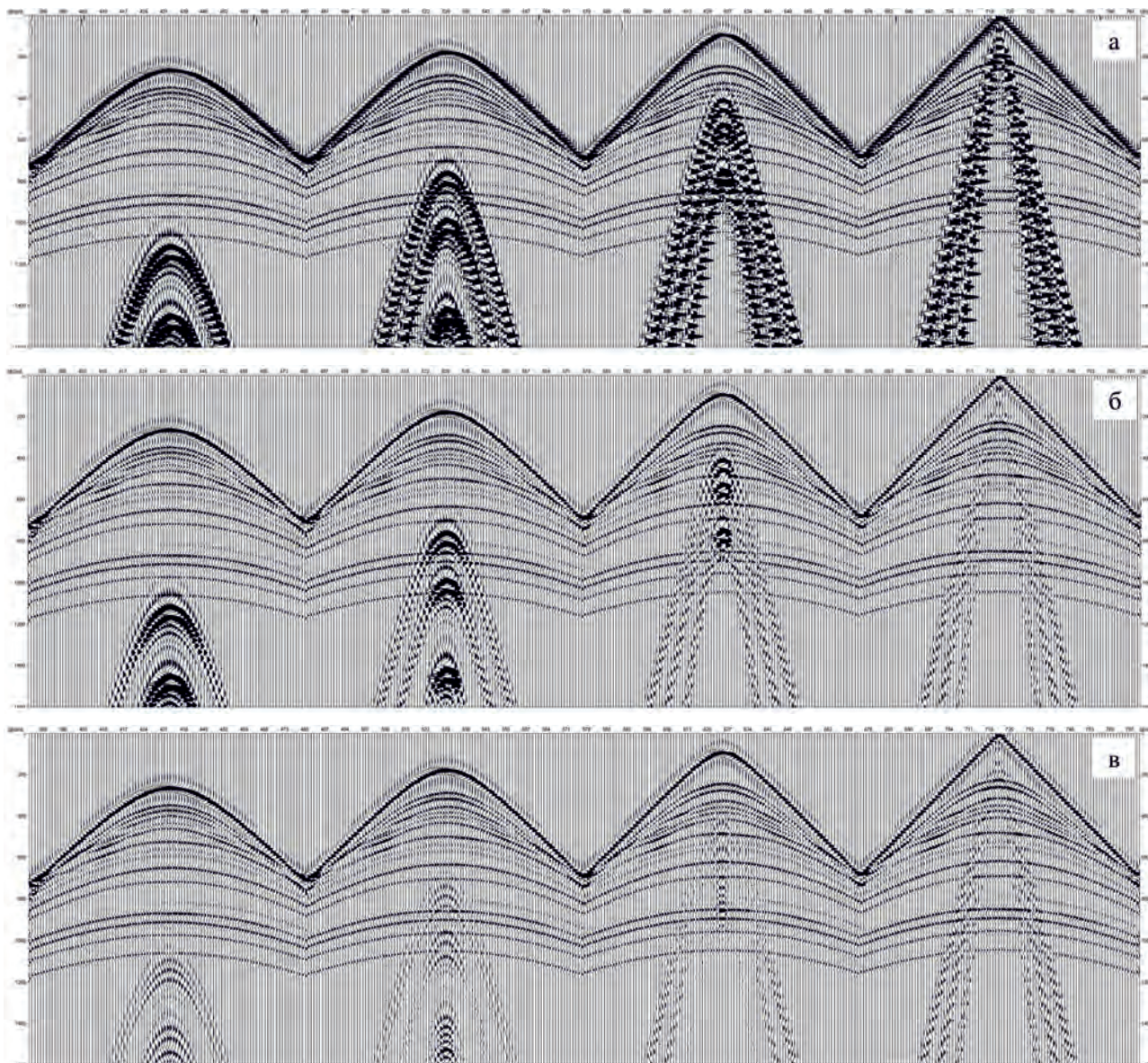
ческая миграция Кирхгофа по синтетическому временному разрезу. На рис.3,б представлен полученный результат миграции, который демонстрирует требуемое соответствие, как заданной структурной модели среды, так и реальному временному разрезу.

В продолжение вычислительных экспериментов на площади 100 км² были смоделированы сейсмограммы, содержащие полезные отражения, интенсивные поверхностные волны-помехи, находящиеся в зоне аляйсинга пространственных

частот, и волны первых вступлений, для реальной системы крестовых сейсмических наблюдений с формулой кратности $8 \times 8 = 64$ (16 линий приема в шаблоне расстановки). На рис.4 представлены амплитудные спектры использованных моделей регулярной помехи – поверхностной волны (рис.4,а) и полезных отражений (рис.4,б). Спектр модели поверхностной волны имел максимум на частоте 15 Гц и крутой спад на частоте 30 Гц. Спектр отраженных волн сосредоточен в основном в полосе частот 15-50 Гц.

▼ Рис. 4. Амплитудные спектры моделей: а) поверхностной волны; б) отражений.

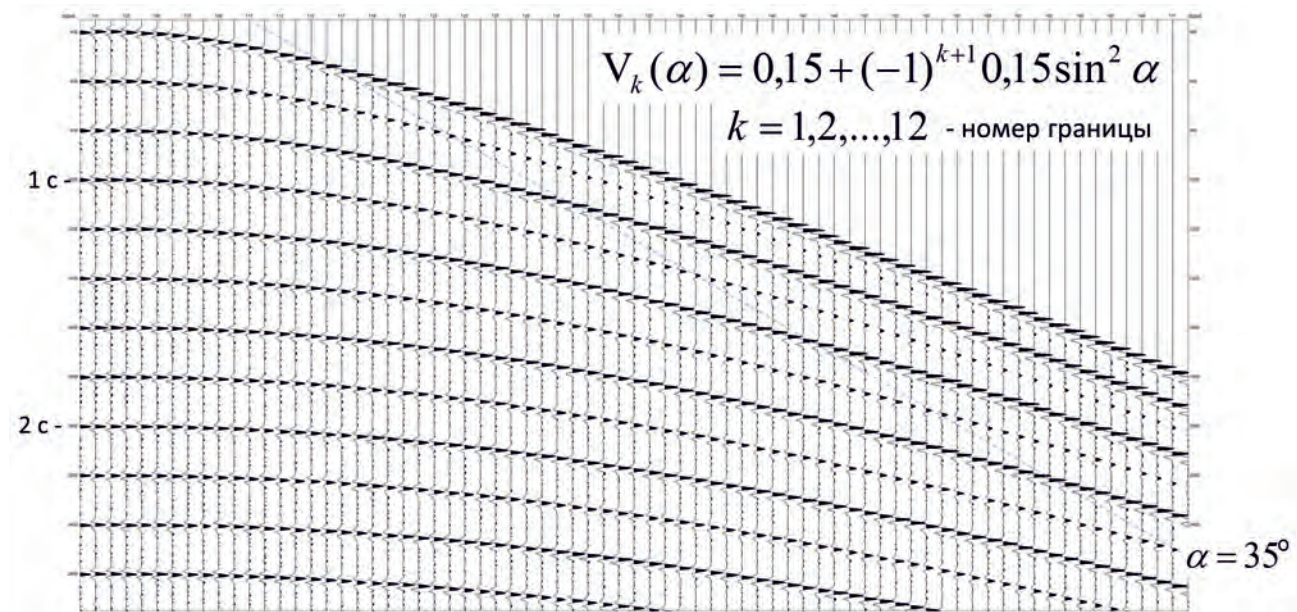




▲ Рис. 5. Сейсмограммы ОПВ на соседних линиях приема шаблона крестовой расстановки после полосой фильтрации [10-15, 100-120] Гц: а) без группирования сейсмоприемников; б) группы из 12 приемников с шагом 5 м; в) группы из 12 приемников с шагом 5 м и группы из 4 источников с шагом 15 м.

На рис.5 представлены сейсмограммы для 4-х соседних линий приема с шагом пунктов приема 50 м, отстоящих друг от друга на 300 м, шаблона крестовой расстановки. Для подавления регулярных помех – поверхностных волн, все представленные сейсмограммы были профильтрованы полосовым трапецидальным фильтром [10-15, 100-120] Гц. На рис.5,а представлены сейсмограммы, моделирующие регистрацию в отсутствии группирования сейсмоприемников («группа в точке»); на рис.5,б - с

использованием линейных групп из 12 сейсмоприемников, расположенных с шагом 5 м; и на рис.5,в – с использованием линейных групп из 12 сейсмоприемников с шагом 5 м и, дополнительно, линейных групп из 4 источников с шагом 15 м, расположенных вдоль линий пунктов возбуждения. Приведенные результаты моделирования призваны продемонстрировать, что группирование, фактически реализующее антиалясинговый фильтр пространственных частот [7], позволяет существенно повысить



▲ Рис.6. Фрагмент сейсмограммы с отражениями от 12 горизонтальных границ с одинаковыми коэффициентами отражения при нормальном падении и градиентами противоположных знаков; синяя пунктирная линия ограничивает диапазон углов падения 35 градусов.

соотношение сигнал/помеха на полевых сейсмических записях, не приводя к заметному искажению полезных сигналов. Важно подчеркнуть, что отмеченное повышение соотношения сигнал/помеха за счет группирования не достижимо с помощью применения одних лишь процедур сигнальной обработки.

Из геометрических соображений ясно, что эффективность использования линейных групп приемников падает с увеличением бокового смещения линий приема от источника возбуждения, что демонстрирует рис.5,б на боковых линиях приема шаблона крестовой расстановки. Этот недостаток можно преодолеть с помощью дополнительного использования линейных групп источников, расположенных вдоль линий пунктов возбуждения. Рис.5,в демонстрирует, что использование даже не вполне полноценных линейных групп, содержащих 4 источника с шагом 15 м (как это практикуется при вибросейсмических наблюдениях) имеет выраженный положительный эффект. Улучшенный резуль-

тат можно получить при использовании т.н. «динамических групп», которые позволяют достичь 5-метрового шага воздействий виброисточников в линейной группе, что делает такую группу полноценной. При этом комбинированное использование полноценных линейных групп источников и приемников позволяет достичь азимутально-независимого подавления поверхностных волн-помех в зоне аляйсинга пространственных частот на всех линиях приема крестовой расстановки [7].

Моделирование AVO-эффектов

Для тестирования и демонстрации возможностей моделирования отраженных волн с учетом зависимости локальных коэффициентов отражения от угла падения на рис.6 приведен результат моделирования волн, отраженных от 12 горизонтальных границ раздела, расположенных с равным шагом в диапазоне вертикальных времен от 400 мс до 2600 мс. Для моделирования AVO-эффектов была использована известная теорети-

ческая зависимость коэффициентов отражения $V(\alpha)$ от угла падения α вида:

$$V(\alpha) = V_0 + G \sin^2 \alpha, \quad (6)$$

содержащая два независимых параметра: V_0 - коэффициент отражения при нормальном падении, G - градиент. В текущем эксперименте коэффициенты отражения $V_k(\alpha)$ на границах с номерами $k=1, \dots, 12$ имели одинаковую величину при нормальном падении: $V_k(0)=0,15$ и градиенты $G_k=(-1)^{k+1}0,15$ с чередующимися знаками при переходе от одной границы к другой. В соответствии с заданными параметрами результаты моделирования отраженных волн, представленные на рис.6, демонстрируют попеременное увеличение и уменьшение амплитуд отраженных волн с ростом угла падения или увеличением удаления источник-приемник. На рис.6 отмечена линия, ограничивающая диапазон удалений источник-приемник, соответствующая диапазону углов падения в пределах 35 градусов, в пределах которого допустимо использование приближенного соотношения (6).

Отметим, что использованный в программе сейсмического моделирования [2] алгоритм позволяет адекватно моделировать эффекты AVO для границ достаточно произвольной формы.

Заключение

Разработаны экономичный алгоритм и программа [2] для оперативного моделирования на PC или ноутбуке сейсмических временных разрезов и 3-D сейсмограмм для систем полевых наблюдений крестового типа. Моделирование отраженных и рассеянных волн основано на приближении Кирхгофа и выполняется в рамках 2,5-D среднескоростной

акустической модели среды, свойства которой не меняются в ортогональном направлении относительно плоскости глубинного разреза. Результаты моделирования адекватно учитывают дифракцию, рассеяние и фокусировку волн в областях каустик для сред со сложной и нерегулярной формой отражающих границ. Доступны опция имитационного моделирования диспергирующих поверхностных волн-помех, а также прямой и рефрагированных волн первых вступлений. Предусмотрена возможность учета угловой зависимости коэффициентов отражения для моделирования AVO-эффектов, а также частотно-зависимого поглощения в среде с заданной величиной параметра добротности. Доступно моделирование действия линейных групп приемников и источников с заданными параметрами. Приведен результат моделирования временного разреза и сейсмограмм для объекта, расположенного в Восточной Сибири в условиях высокоскоростной среды со сложным строением. Продемонстрирован положительный эффект группирования приемников и источников, реализующего антиалайсинговый фильтр пространственных частот и позволяющего значительно повысить отношение сигнал/помеха, не достижимое применением одних лишь процедур сигнальной обработки. Созданная в ЗАО ГСК версия программы 3-D сейсмического моделирования [2] имеет развитый интерфейс, облегчающий построение модели среды, и доступна для широкого использования. В числе возможных опций планируется реализация моделирования отраженных PS-волн от границ раздела сложной формы. Визуализация сейсмических данных выполнена средствами утилиты SeiSee (разработка ДНМГ).

Литература

Models and Computer Simulations. – 2014.
– V.6, № 4. – P. 342–350.

1. Бьерно Л., Сан Ш. Применение приближения Кирхгофа к задачам рассеяния на упругих неровных поверхностях // Акустический журнал. – 1995. – т. 41, № 5. – С. 725–736.

2. Закариев Ю.Ш., Казаков А.К., Плешкевич А.Л. ГСК-Сейсмо моделирование / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 202-4614475. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26.02.2024 г.

3. Закиров А.В., Левченко В.Д., Иванов А.В. и др. Высокопроизводительное 3D моделирование полномасштабного сейсмического поля для задач сейсморазведки // Геоинформатика. – 2017. – №3. – С. 34-45.

4. Калиткин, Н. Н. Численные методы / М.: Наука, 1978. – 512 с.

5. Морс Ф.М., Фешбах Г. Методы теоретической физики, т.1 / М.: ИЛ, 1958. – 931 с.

6. Плешкевич А.Л., Турчанинов В.И. Экономичные квадратные схемы с осреднением в окне и их приложение к сейсмической миграции Кирхгофа // Геофизика. – 2012. – № S (спец. выпуск). – С. 57–65.

7. Плешкевич А.Л. Актуальные вопросы группирования источников и приемников при наземных 3D сейсмических наблюдениях // Геофизика. – 2007. – № 4. – С. 93–102.

8. Lisitsa V., Vishnevskiy D. Lebedev scheme for the numerical simulation of wave propagation in 3D anisotropic elasticity // Geophysical Prospecting. – 2010. – т. 5, № 4 – С. 619-635.

9. Petrov I.B., Khokhlov N.I. Modeling 3D seismic problems using high-performance computing systems // Mathematical