

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ЭКСПРЕСС МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ

В пакете программ «ВОЛНА-М» реализовано двумерное моделирование в лучевом приближении для слоистых моделей, состоящих из однородных упругих слоев с гладкими криволинейными границами. В основе программ моделирования лежит набор процедур, реализующих решение системы уравнений Кнотта-Цёппритца в комплексной области и обеспечивающих корректный расчет коэффициентов отражения, прохождения и конверсии. С помощью пакета программ можно рассчитать амплитуды, годографы волн, а также построить сейсмограммы для заданной совокупности волн.

Ключевые слова: моделирование, сейсморазведка, лучевое приближение, сейсмическое волновое поле.

Введение

В настоящее время в сейсморазведке активно используется моделирование сейсмических волновых полей. Математическое моделирование полей заключается в составлении теоретических моделей, отображающих физическое строение реальных геологических сред, и в расчете волновых полей, соответствующих этим моделям. При этом процесс математического моделирования состоит из нескольких основных этапов (Номоконов, 1990).

На первом этапе формируется теоретическая модель среды, учитывающая всю существенную для решения задачи априорную информацию и в то же время возможно более простая по своему строению. В этом процессе необходим компромисс между стремлением наиболее полно использовать всю имеющуюся априорную информацию и ограниченными возможностями как способов расчета волновых полей, так и применяемых средств вычислительной техники.

На втором этапе необходимо рассчитать волновое поле, причем постановка задачи должна учитывать особенности применяемой аппаратуры и методики сейсморазведочных работ, а точность и детальность решения должны соответствовать как специфике задачи, так и особенностям последующего использования результата.

При интерпретационном моделировании появляется третий этап, заключающийся в сравнении и согласовании результатов моделирования и реальных данных сейсморазведки. На этом этапе возникает необходимость итерационного возвращения к предшествующим этапам, пересмотру или коррекции их результатов. Учитывая то, что многие параметры исходной модели среды (плотности горных пород, скорости упругих волн, особенно поперечных, а также параметры поглощения) чаще всего точно нам не известны, необходимость в итерационной коррекции параметров исходной модели возникает практически всегда.

В рассматриваемом пакете программ «ВОЛНА-М» реализовано двумерное моделирование в лучевом приближении для слоистых моделей, состоящих из однородных упругих жидких или твердых слоев с гладкими криволинейными границами (до 100 слоев), при этом предполагается, что размеры неоднородностей среды значительно больше радиуса зоны Френеля. В основе программ моделирования лежит набор процедур, реализующих численное реше-

ние системы уравнений Кнотта-Цёппритца в комплексной области и обеспечивающих корректный расчет коэффициентов отражения и прохождения, в том числе и для закритических углов падения. Используемый лучевой подход позволяет учитывать образование обменных волн, изменение отражающих свойств границ при наклонном падении волн на них, влияние кривизны границ и волновых фронтов, линейно-зависимое от частоты поглощение волн в среде. Достоинством лучевого метода является и то, что эффекты расхождения, поглощения, кривизны границ и отражения-преломления могут быть учтены по отдельности.

1. Назначение пакета «ВОЛНА-М»

Пакет программ «ВОЛНА-М» разработан на кафедре геофизики геологического факультета Кубанского государственного университета и предназначен для моделирования сейсмических волновых полей на персональных ЭВМ применительно к задачам МОВ и ВСП (Электронный ресурс: <http://volna-m.ru>).

Пакет позволяет выполнять расчеты годографов, амплитудных графиков, лучевых диаграмм одиночных объемных (в том числе обменных) P - и S -волн, а также выполнять построение синтетических сейсмограмм для любых моделей, содержащих до 100 однородных упругих (твердых или жидких) поглощающих слоев с криволинейными в плоскости XOZ непрерывными границами, в том числе и в области закритических углов падения.

Результаты моделирования могут быть использованы для изучения условий формирования обменных и других объемных сейсмических волн на границах раздела упругих слоев, оценки их ожидаемых динамических и кинематических характеристик, а также для выбора рациональной методики полевых работ методами МОВ и ВСП на основе теоретических оценок динамических и кинематических характеристик упругих волн разных типов, полученных в ходе модельных вычислительных экспериментов.

2. Функциональное назначение программ

Пакет программ для моделирования «ВОЛНА-М» обеспечивает выполнение следующих функций:

- задание всех параметров модели среды и параметров расстановки;
- расчет и визуализация годографов (Рис. 1), ампли-

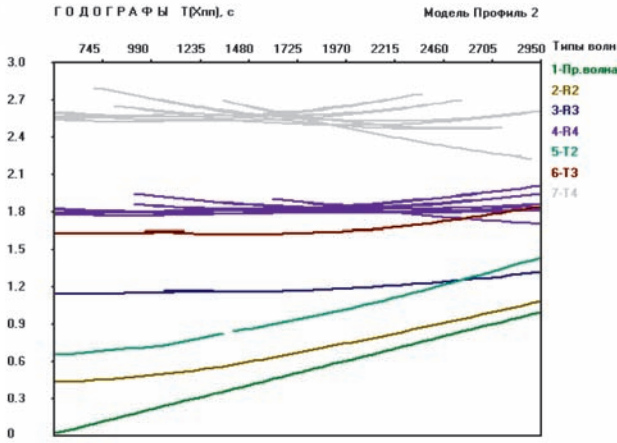


Рис. 1. Годографы волн, рассчитанные для модели «Профиль 2».

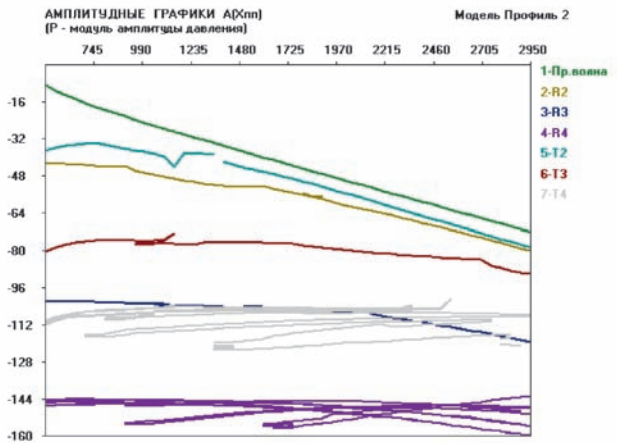


Рис. 2. Амплитудные графики волн, полученные для модели «Профиль 2».

тудных графиков (Рис. 2), лучевых диаграмм (Рис. 3) и поляр одиночных объемных (в том числе любых обменных) P- и S-волн;

- выбор сигнала источника, параметров фильтрации;
- расчет (в частотной области), построение (во временной области) и визуализация одиночных волн с учетом их расхождения, поглощения, коэффициентов прохождения, отражения и конверсии, в том числе для закритических углов падения;
- построение (во временной области), запись и визуализация синтетических сейсмограмм (Рис. 4), содержащих любую совокупность предварительно рассчитанных объемных P- и S-волн (в том числе любых обменных, многократных, неполнократных и т.п. – всего до 100 волн).

Построение синтетических сейсмограмм и для МОВ, и для ВСП может быть выполнено как с различными теоретическими импульсами (импульс Берлаге, импульс Рикера, импульс с колокольной огибающей (Рис. 5), затухающая синусоида с любыми параметрами (Номоконов, 1990)), так и с сигналами реальных источников разных типов, экспериментально зарегистрированными в сейсмической полосе частот 0-250 Гц, а также при любых параметрах фильтрации.

3. Краткое описание алгоритмов

Траектории лучей от источника до каждой точки приема любых объемных волн, претерпевающих различное количество актов обмена, преломления и отражения, рассчитываются в соответствии с принципом Ферма по изве-

стным алгоритмам геометрической сейсмологии (Номоконов, 1990; Алексеев и др., 1959).

Расчет годографов основан на определении времен пробега волн вдоль траекторий лучей, найденных из принципов геометрической сейсмологии, и выполняется также в соответствии с известными соотношениями для монотипных и обменных волн (Номоконов, 1990; Алексеев и др., 1959; Бреховских и др., 1989; Шерифф и др., 1987). Так например, для монотипной волны, отраженной от границы k-го и k+1-го слоев, годограф рассчитывается в соответствии с очевидным соотношением:

$$T_k(X_{mn}) = \sum_{i=1}^k \frac{S_i}{V_i} + \sum_{i=k}^1 \frac{S_i}{V_i}, \quad (1)$$

где S_i – часть траектории монотипной волны в i-ом слое вдоль луча, выходящего в точку приема X_{mn} ; V_i – скорость монотипной волны в i-ом слое.

Расчет амплитудных графиков основан на учете влияния коэффициентов отражения, прохождения и конверсии, а также геометрического расхождения и поглощения волн разных типов при распространении вдоль траекторий лучей, выходящих в заданные точки приема (Номоконов, 1990; Алексеев и др., 1959; Бреховских и др., 1989; Кондратьев, 1986). Рассмотрим расчет амплитудного графика волны, претерпевающей обмен (с P на S) на подошве j-го слоя, и отраженной от верхней границы k+1 слоя:

$$A(X_{mn}) = (T_P(\frac{1}{2}) \cdot T_P(\frac{2}{3}) \cdot \dots \cdot K_{PS}(\frac{j}{j+1}) \cdot \dots \cdot T_S(\frac{k-1}{k}) \cdot R_S(\frac{k}{k+1}) \cdot T_S(\frac{k-1}{k}) \cdot \dots \cdot T_S(\frac{3}{2}) \cdot T_S(\frac{2}{1}) \cdot \frac{F(\alpha)}{D} \cdot e^{(Sp \cdot Dp1 + \dots + Spj \cdot Dpj + Ss(j+1) \cdot Ds(j+1) + \dots + Ss1 \cdot Ds1)}, \quad (2)$$

где $T_P(\frac{i}{i+1})$ – модуль коэффициента прохождения P-волны на границе i-го и i+1-го слоев; $T_S(\frac{i}{i+1})$ – модуль коэффициента прохождения S-волны на границе i-го и i+1-го слоев; $K_{PS}(\frac{j}{j+1})$ – модуль коэффициента конверсии

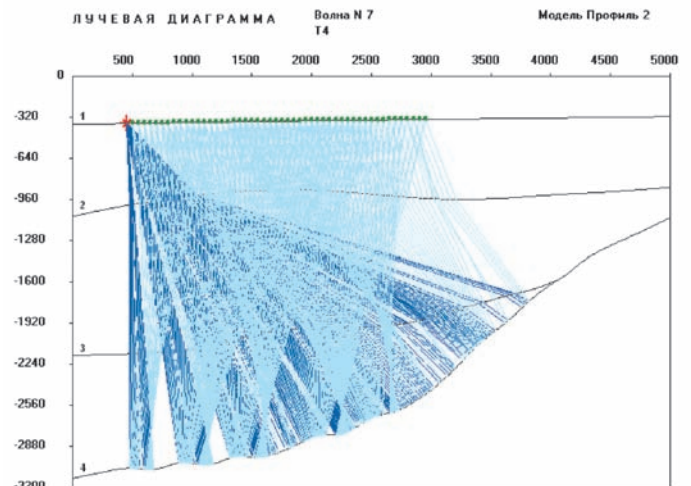


Рис. 3. Лучевая диаграмма для волны, отразившейся с обмена от четвертой границы.

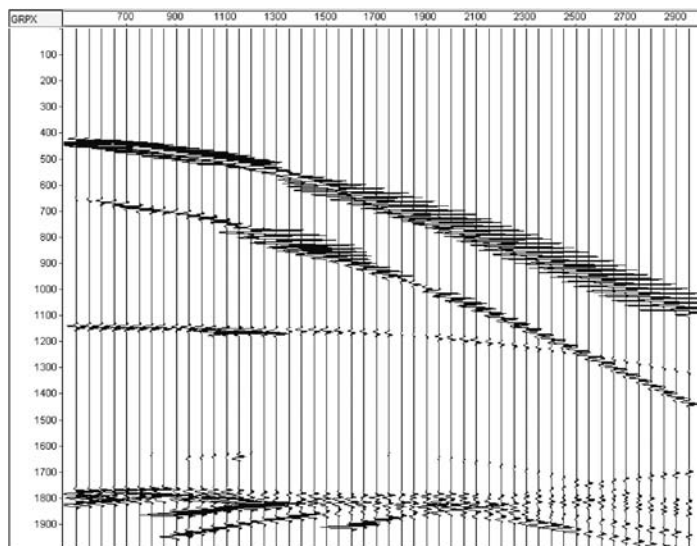


Рис. 4. Сейсмограмма для модели «Профиль 2».

P -волны в S -волну на границе j -го и $j+1$ -го слоев; $R_S \left(\frac{k}{k+1} \right)$

– модуль коэффициента отражения S -волны от границы k -го и $k+1$ -го слоев; D_{pi} – пластовый коэффициент поглощения P -волны в i -ом слое (на частоте $f = 50$ Гц); D_{si} – пластовый коэффициент поглощения S -волны в i -ом слое (на частоте $f = 50$ Гц); S_{pi} – часть траектории P -волны в i -ом слое вдоль луча, выходящего в точку приема X_m (или H_m); S_{si} – часть траектории S -волны в i -ом слое вдоль луча, выходящего в точку приема X_m (или H_m); $F(\alpha)$ – характеристика чувствительности сейсмоприемников в функции угла подхода волны α : для сейсмоприемников X -компоненты $F(\alpha) = \sin(\alpha + \varphi)$, для сейсмоприемников Z -компоненты $F(\alpha) = \cos(\alpha + \varphi)$, для приемников давления $F(\alpha) = 1$, для P -волн $\varphi = 0$, для S -волн $\varphi = 90^\circ$; D – коэффициент геометрического расхождения фронта волны при распространении ее вдоль луча, выходящего в точку приема X_m (или H_m).

Коэффициент геометрического расхождения учитывает при этом как влияние кривизны волнового фронта, так и влияние кривизны отражающих (преломляющих) границ и изменение площади поперечного сечения лучевой трубки при прохождении волной границы (Banik et al., 1989; Исакович, 1973).

Расчет волн в программе «ВОЛНА-М» осуществляется в частотной области в соответствии с известными положениями теории распространения упругих волн в многослойной среде с криволинейными границами с учетом поглощения и с учетом изменения формы импульсов при полном внутреннем отражении. Построение сейсмических трасс во временной области при этом осуществляется обратным преобразованием Фурье также в соответствии с алгоритмом БПФ (Бреховских и др., 1989; Бат, 1980). Рассчитанные синтетические сейсмограммы могут быть дополнены нерегулярным шумом с заданными спектральными и амплитудными характеристиками.

Алгоритм расчета коэффициентов прохождения, отражения и конверсии в полном виде был разработан применительно к задаче создания специализированного пакета программ для расчета распределения энергии плоских сейсмических P - и S -волн при падении их на плоскую границу раздела двух упругих сред (Шерифф и др., 1987). В состав этого пакета вошла также и Delphi-программа

RT_WAVE.EXE, в которой реализовано численное решение системы уравнений Цёппритца в комплексной области применительно к следующим случаям:

- P -волна падает из твердого тела на границу раздела с атмосферой;
- S -волна падает из твердого тела на границу раздела с атмосферой;
- P -волна падает на границу раздела двух твердых сред;
- S -волна падает на границу раздела двух твердых сред;
- P -волна падает из жидкости на границу твердого тела;
- P -волна падает из твердого тела на границу раздела с жидкостью;
- S -волна падает из твердого тела на границу раздела с жидкостью.

В программе каждый из этих случаев реализован в виде отдельной процедуры, при этом все они используются при расчете волн и амплитудных графиков для получения коэффициентов конверсии, прохождения или отражения.

Входными параметрами для каждой из этих семи процедур являются плотности и скорости продольных и поперечных (для твердых сред) волн в каждой из двух упругих сред по обе стороны от границы раздела, а также заданный угол падения волны на границу.

4. Практическое применение программы

Применение программы «ВОЛНА-М» наиболее эффективно при решении следующих практических задач:

1. На этапе проектирования полевых работ рациональный выбор параметров системы наблюдений, обеспечивающей наиболее надежное прослеживание целевых волн, может быть выполнен на основе моделирования, по результатам сопоставления годографов и амплитудных графиков целевых волн и волн-помех, полученных для модельного разреза при разных значениях параметров X_{pv} , X_{min} , X_{max} и др. Особенно актуален такой подход при сложной геометрии границ разреза, при работах по технологии многоволновой сейсморазведки (МВС), а также применительно к задачам вертикального сейсмического профилирования (ВСП) и особенно его поляризационной модификации ПМ ВСП.

2. Имея данные о рельефе дневной поверхности на линии профиля, а также зная свойства верхней части разреза, полученные при проведении полевых работ, использование программ моделирования дает возможность получения более точных значений статических поправок, которые могут быть использованы при обработке полученных сейсморазведочных данных.

3. До проведения полевых работ предварительная оценка ожидаемых AVO-эффектов на границах исследуемого разреза может быть выполнена по модельным сейсмограммам, рассчитанным с использованием выбранных параметров расстановки и априорных сведений о разрезе. Для большей достоверности в оценке динамических характеристик регистрируемых целевых волн при этом следует учитывать и поглощающие свойства горных пород изучаемого разреза.

4. Особый интерес представляет возможность отработки и тестирования на синтетических сейсмограммах, рассчитанных для известного модельного разреза, отдельных, в том числе и нестандартных обрабатывающих процедур, а также оценка эффективности их применения в сравне-

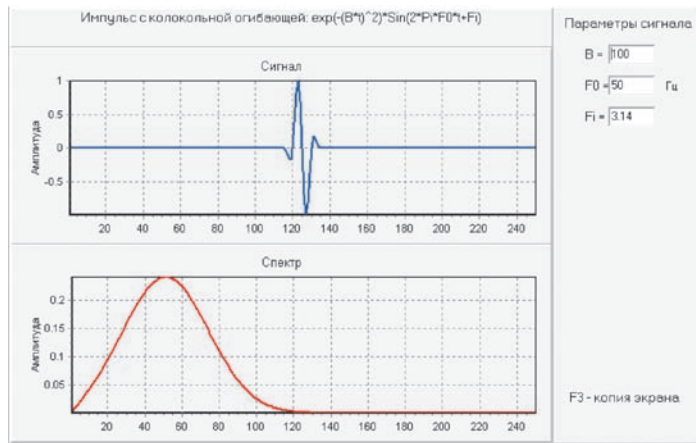


Рис. 5. Теоретический импульс с колокольной огибающей.

нии с известными процедурами стандартных обрабатывающих и интерпретационных пакетов.

Заключение

Несмотря на определенные недостатки и ограничения, лучевой метод, реализованный в пакете программ «ВОЛНА-М», при современных ЭВМ является самым быстродействующим и наиболее эффективным средством для моделирования сейсмических волновых полей в средах, включающих выклинивания, складчатые и т.п. структуры, которые могут быть аппроксимированы слоистыми моделями с непрерывными криволинейными границами. С помощью этих программ достаточно просто просмотреть информацию о каждой волне отдельно, оценивая ее вклад в общую картину, что достаточно сложно сделать в других видах моделирования. Благодаря физической ясности результатов он имеет ведущее значение при расчетах волн, когда размеры неоднородностей среды значительно больше радиуса зоны Френеля. При этом расчеты основаны на определении времен пробега волн вдоль траекторий лучей, найденных из принципов геометрической сейсмологии, и учете влияния геометрического расхождения, коэффициентов отражения, прохождения и конверсии на амплитуды колебаний.

Следует отметить, что результаты расчетов амплитуд довольно критичны к гладкости задания границ модели. Небольшие изменения конфигурации границ, приводящие к локальным флуктуациям вторых производных времен на поверхности, создают значительные локальные аномалии амплитуд, практически не влияя на времена прихода волн. В ряде случаев необоснованные необходимостью усложнения конфигурации границ модели среды могут приводить к резкому усложнению волновой картины, к появлению точек возврата и соответствующих им петель на годографах рассчитываемых волн. Поэтому при формировании моделей следует внимательно и очень обоснованно уменьшать размеры неоднородностей криволинейных границ модели среды, всегда соотнося их с размерами зоны Френеля.

Оценивая перспективы дальнейшего совершенствования этого пакета необходимо наметить следующие возможные направления работы:

- расчет синтетических сейсмограмм может быть выполнен для некоторых специфических случаев (донная приемная коса, источник в виде направленной интерференционной излучающей системы и т.п.);

- существующий набор корректно синтезируемых волн может быть дополнен поверхностными и головными *P*- и *S*-волнами;

- разработка варианта программы моделирования для метода «Вибросейс».

В настоящее время ведется разработка новой версии пакета, в которой будет реализована задача моделирования для случая частотно-зависимых коэффициентов отражения-преломления на границе линейно-неупругих сред.

Литература

Алексеев А.С., Гельчинский Б.Я.. О лучевом методе вычисления полей волн в случае неоднородных сред с криволинейными границами раздела. Под ред. Г.И. Петрашеня. *Сб. мат-ов: «Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн»*. Вып. 3. 1959. 107-160.

Бат М. Спектральный анализ в геофизике. М.: Недра. 1980. 535.

Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред. М. 1989. 416.

Исакович М.А. Общая акустика. М. 1973. 495.

Кондратьев О.К. Сейсмические волны в поглощающих средах. М. 1986. 176.

Сейсморазведка: справочник геофизика. Под ред. В.П. Номоконова. М. 1990.

Шерифф Р., Гелдарт. М. Сейсморазведка. М. Мир. 1987.

Электронный ресурс: <http://volna-m.ru>.

Banik N.C., Lerche I., Shuey R.T. Offset dependent amplitudes: effects of wavefront and reflector curvature in homogeneous and layered media. *Pure and Applied Geophysics*. Vol. 130. N1. 1989. 100-125.

I.A. Gontarenko, V.I. Gulenko. Software for prompt modeling of seismic wave fields.

We present a new software package («Volna-M») for a 2D ray approximation seismic modeling in stratified models, which consist of homogenous elastic layers with curvilinear smooth boundaries. Solution of full Knott-Zoeppritz equations in complex domain enables correct calculation of reflection, transmission and conversion coefficients. Thus, for a given set of waves, amplitudes, travel-time curves and synthetic seismograms can be determined.

Key words: modeling, seismic, ray approximation, seismic wave field.

Игорь Александрович Гонтаренко

Аспирант кафедры геофизики Кубанского государственного университета. Научные интересы: моделирование сейсмических волновых полей.

350 040, Краснодар, ул. Ставропольская, 149.
Тел.: (903) 451-30-65.



Владимир Иванович Гуленко

Д.тех.н., профессор кафедры геофизики Кубанского государственного университета. Научные интересы: моделирование сейсмических волновых полей, техника и технологии морской сейсморазведки, морские сейсмические источники, инженерная геофизика.

350040, Краснодар, ул. Ставропольская, 149.
Тел.: (861) 219-96-34.

