

О ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В УГЛЕНОСНОЙ ТОЛЩЕ

Глухов А.А.

Донецкий государственный научно-исследовательский

Проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики и маркшейдерского дела
НАН Украины

Abstract

Glukhov A.A. By the example of software package to simulate propagation of seismic transients within coal-bearing series developed and used in the UkrNIMI of NANU principles for producing systems of such purposes are described. A number of solutions are given that allow employing software environment efficiently in engineering procedures of underground and land seismic exploration.

Шахтная сейсморазведка как одно из важных направлений в прикладной науке на всех этапах своего становления и развития опиралась на математическое моделирование процесса распространения сейсмических колебаний в толще пород, содержащих пласты полезного ископаемого. При этом набор применяемых методов существенно зависел от уровня развития компьютерной техники. До середины 80-х годов доминировали варианты аналитических матричных методов на основе подхода, который был разработан Томсоном [1]. Их использование было правомерно только для строго ограниченного набора моделей, однако не требовало мощных ЭВМ. Дальнейшее развитие компьютерной техники открыло дорогу применению численных методов (в первую очередь - конечно-разностных), позволяющих моделировать проходящие в среде процессы с высокой степенью адекватности на моделях любой сложности [2-6].

Это повлекло за собой вовлечение методов математического моделирования в технологические процессы сейсморазведки как на этапах предварительного анализа условий проведения натуральных экспериментов, так и на этапах интерпретации результатов [7]. При этом чрезвычайно актуальным стал вопрос о создании специализированных программных средств, позволяющих оперативно в рамках разработанных методик сейсморазведки проводить численные эксперименты и анализировать их результаты. В УкрНИМИ еще в начале 90-х была разработан комплект программ [8], решающих поставленные задачи, который многие годы успешно использовался на практике и постоянно совершенствовался. В настоящее время разработана и применяется новая версия данного программного средства. Описанию принципов, которые лежат в основе его структуры и ряда технологических решений, обеспечивающих его эффективное использование, посвящена данная статья.

На рис. 1 приведены основные этапы процесса моделирования сейсмических колебаний и обработки результатов. Их можно объединить в несколько групп. Первая группа этапов посвящена разработке модели среды, заданию условий возбуждения сейсмических колебаний и системы наблюдений. При этом моделирование среды начинается с разработки сейсмогеологической модели, и на этой основе - физико-математической. Физико-математическая модель служит базисом для применения группы вычислительных этапов, в рамках которых производится расчет коэффициентов конечно-разностного представления и последующее моделирование процесса распространения волнового поля. И, наконец, анализ результатов моделирования включает в себя целый набор процедур, позволяющих получать те или иные характеристики как волнового поля в целом, так и его отдельных структурных составляющих.

Следует отметить, что трём группам этапов проведения численных экспериментов соответствуют три основных программных блока комплекта: блок разработки модели, блок моделирования и блок анализа результатов. Объединенные в общую оболочку, они реализованы как независимые. Обмен информацией производится посредством файлов. Эта мера вызвана тем, что, как показал опыт использования комплекта программ на практике, часто не удаётся выполнить всю технологическую цепочку моделирования в один приём. Кроме этого, для уменьшения затрат времени при работе с набором моделей среды в рамках одного производственного процесса целесообразно однотипные операции выполнять за один цикл.

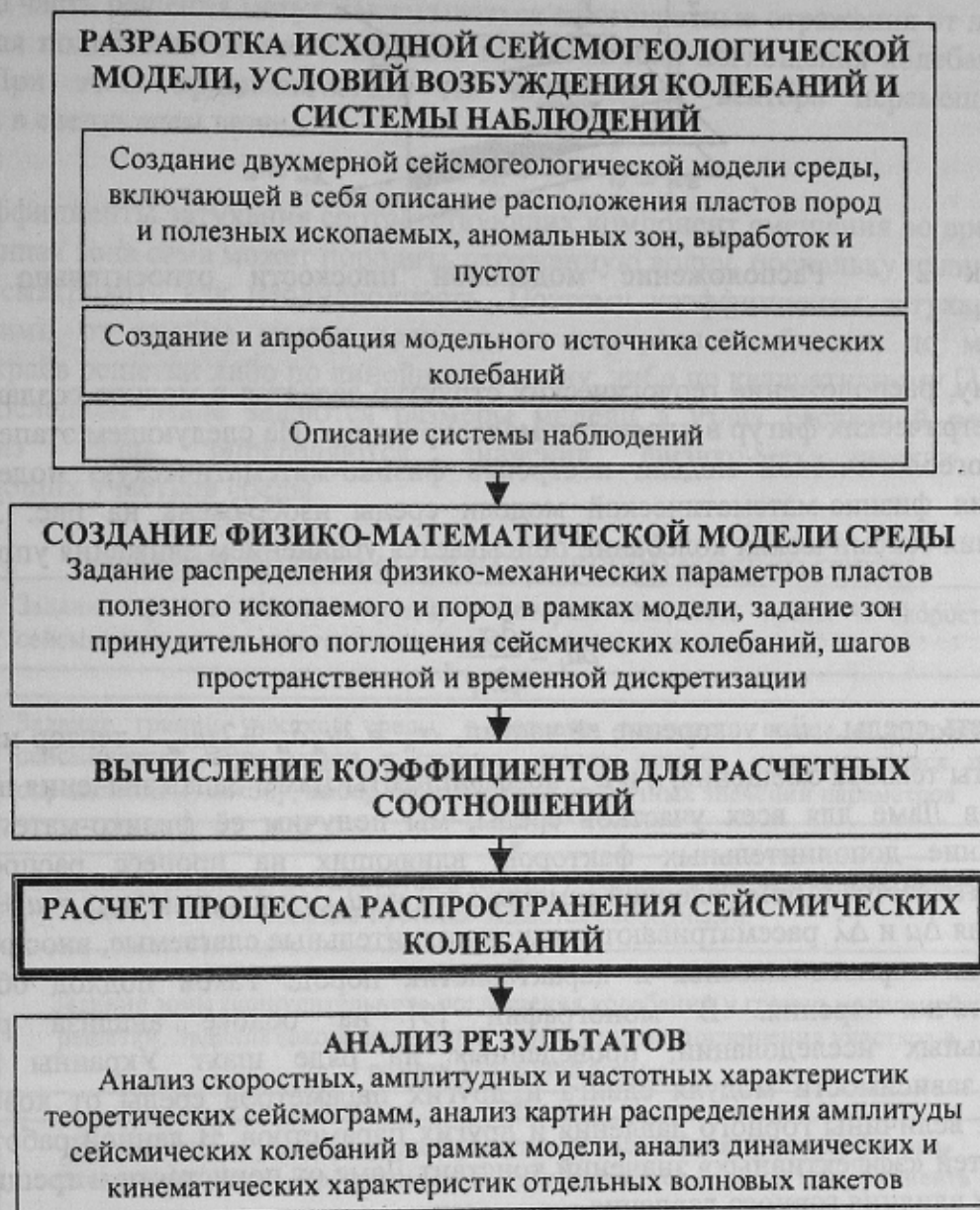


Рисунок 1 - Основные этапы процесса моделирования сейсмических колебаний

Рассмотрим подробнее каждый из блоков. Блок построения модели позволяет на основе априорных данных о горно-геологических условиях залегания полезных ископаемых в исследуемой области построить соответствующую сейсмогеологическую модель, т.е. задать геометрию расположения основных геологических структур, слагающих толщу пород. При необходимости задается расположение различных типов геологических нарушений. Это мелкоамплитудные разрывные тектонические нарушения, пликативные тектонические нарушения (мелкие складки и флексуры), размывы угольных пластов, кластические

инъекции, зоны повышенного горного давления (ПГД). Подавляющее большинство методов математического описания процесса распространения сейсмоакустических колебаний основывается на двухмерной модели среды. Модельная плоскость располагается перпендикулярно плоскости напластования от источника колебаний к сейсмоприемнику (см. рис. 2). Основное допущение для обоснования возможности применения такой модели заключается в том, что свойства угля, пород и параметры нарушений полагаются неизменными вдоль оси Y .

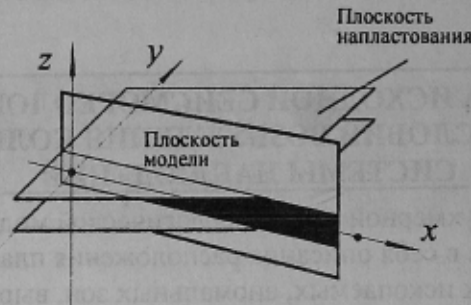


Рисунок 2 - Расположение модельной плоскости относительно плоскости напластования

Согласно этому, расположение геологических структур задается в модуле создания модели набором геометрических фигур в плоскости моделирования. На следующем этапе следует на основе сейсмогеологической модели построить физико-математическую модель. Общая схема создания физико-математической модели среды изображена на рис. 3. Процесс распространения сейсмических колебаний описывается уравнением движения упругой среды в общем виде:

$$\rho \ddot{u}_i = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k}, \quad (1)$$

где ρ - плотность среды, \ddot{u}_i - ускорение её частиц, $\sigma_{ik} = \lambda u_{ll} \delta_{ik} + 2\mu u_{ik}$ - тензор напряжения, u_{ik} - компоненты тензора смещения, λ и μ - коэффициенты Ламе. Задав значения плотности и коэффициентов Ламе для всех участков среды, мы получим её физико-математическую модель. Влияние дополнительных факторов, влияющих на процесс распространения колебаний, учитывается путем условной замены μ и λ на $\mu_{эфф}$ и $\lambda_{эфф}$, где $\mu_{эфф} = \mu + \Delta\mu$, $\lambda_{эфф} = \lambda + \Delta\lambda$. Значения $\Delta\mu$ и $\Delta\lambda$ рассматриваются как дополнительные слагаемые, вносимые за счет учета состояния горного массива и характеристик пород. Такой подход обоснован с физической точки зрения. В монографии [9] на основе анализа результатов экспериментальных исследований, проведенных на ряде шахт Украины и России, представлены зависимости модуля сдвига и других параметров среды от коэффициента пористости, от величины горного давления и других параметров. В данной работе выведен вид зависимостей «эффективных» значений констант Ламе от пористости и трещиноватости пород с учетом влияния горного давления.

На практике часто нет информации о величинах μ и λ . Поэтому при создании модели оперируют величинами V_s и V_p (скорости распространения волн сдвига и сжатия в упругой среде), которые связаны с коэффициентами Ламе соотношениями:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}.$$

Следует отметить, что в программном комплексе предусмотрена возможность задать закон изменения физико-механических параметров среды в рамках любой фигуры, определяющей положение геологической структуры, что позволяет создавать модели с высокой степенью адекватности реальности.

Выработки, пустоты задаются таким же образом, как и геологические структуры – геометрическими фигурами. Поскольку расчет колебаний в них не производится, никаких дополнительных характеристик не задается.

Основной проблемой при использовании конечно-разностных методов на ЭВМ является тот факт, что границы решетки порождают «паразитическую» часть решения, эквивалентную отраженной от свободной границы волне. В шахтной сейсморазведке при моделировании распространения сейсмических колебаний в пласте эта проблема усложняется тем, что скорость распространения сдвиговых волн в угле может в 5-6 и более раз быть меньше, чем скорость распространения продольных волн в породах. В результате на полезную часть решения могут накладываться многократные отражения от любых границ решетки. Для подавления данного эффекта вводится зона поглощения колебаний у границ решетки. При этом предполагается, что компоненты вектора перемещений можно представить в следующем виде:

$$u = ue^{-a_1 t}, \quad v = ve^{-a_2 t}, \quad w = we^{-a_3 t},$$

где a_i – коэффициенты затухания соответствующих компонент смещения во времени. Важен факт, что данная зона сама может породить отраженную волну, поскольку наличие затухания следует рассматривать как неоднородность. Поэтому коэффициенты затухания задаются возрастающими от крайне малых величин во внутренней области, до максимальных значений у краёв решетки либо по линейному закону, либо по квадратичному [3].

На последнем этапе задаются размеры модели в узлах расчетной решетки и для каждого из узлов определяются значения физико-механических параметров соответствующих участков среды.

СОЗДАНИЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СРЕДЫ

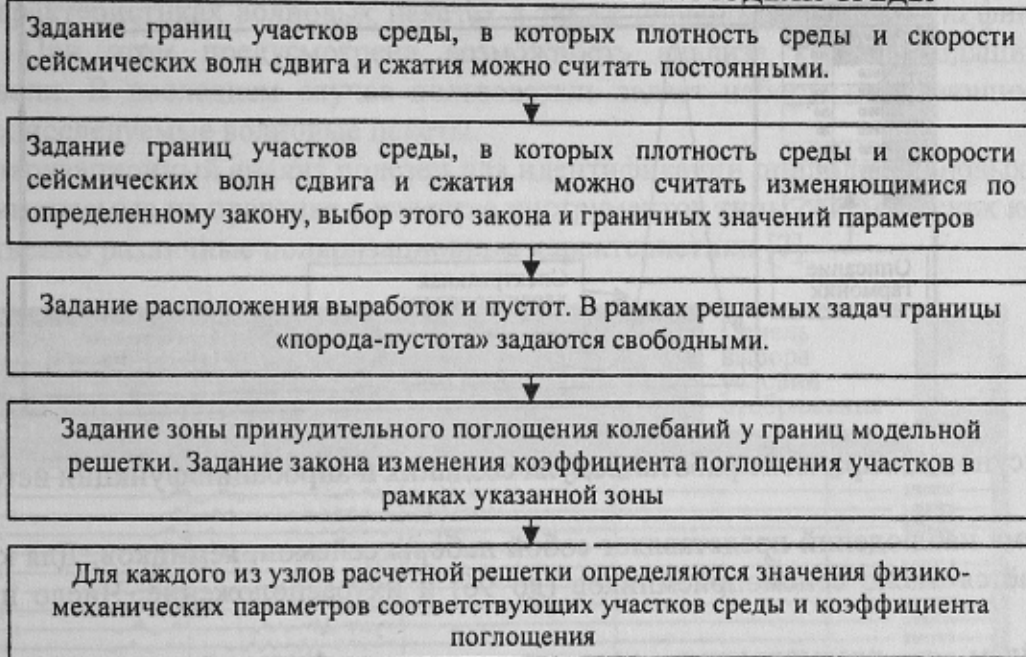


Рисунок 3 - Порядок создания физико-математической модели среды в рамках комплекта программ моделирования процесса распространения сейсмических колебаний

В рамках разработки модели задаются условия возбуждения сейсмических колебаний и система наблюдений. Условия возбуждения включают в себя расположение источника колебаний (предусматривается возможность задания координат как одного источника, так и цепочки синхронно колеблющихся), его направленность (как вдоль любой оси координат, так и по произвольному направлению), шаг дискретизации по времени и функцию

источника. Функция источника задаётся последовательным набором гармоник, представляющих собой полупериоды синусоидальных колебаний заданной амплитуды и частоты. При этом параллельно производится вычисление и отображение спектральной её характеристики (см. рис. 4). В качестве математического аппарата используется быстрое преобразование Фурье (БПФ). Корректируя в интерактивном режиме форму исходного сигнала, его длительность и частоту, пользователь получает возможность получить функцию источника с заданными характеристиками. Автоматически проверяется выполнение условия, чтобы каждая из гармоник описывалась не менее чем 10-15 дискретами по времени.

Следует отметить, что при заданном шаге дискретизации по времени, система автоматически проверяет выполнение необходимого условия устойчивости решения, которые имеют вид [7]:

$$\Delta t \leq \min \left\{ \frac{\min \{ \Delta x_{m,n}, \Delta z_{m,n} \}}{V_{S_{m,n}} \sqrt{2}} \right\}$$

где $V_{S_{m,n}}$ - скорость распространения сдвиговых волн для узла модели с "координатами" (m,n) .

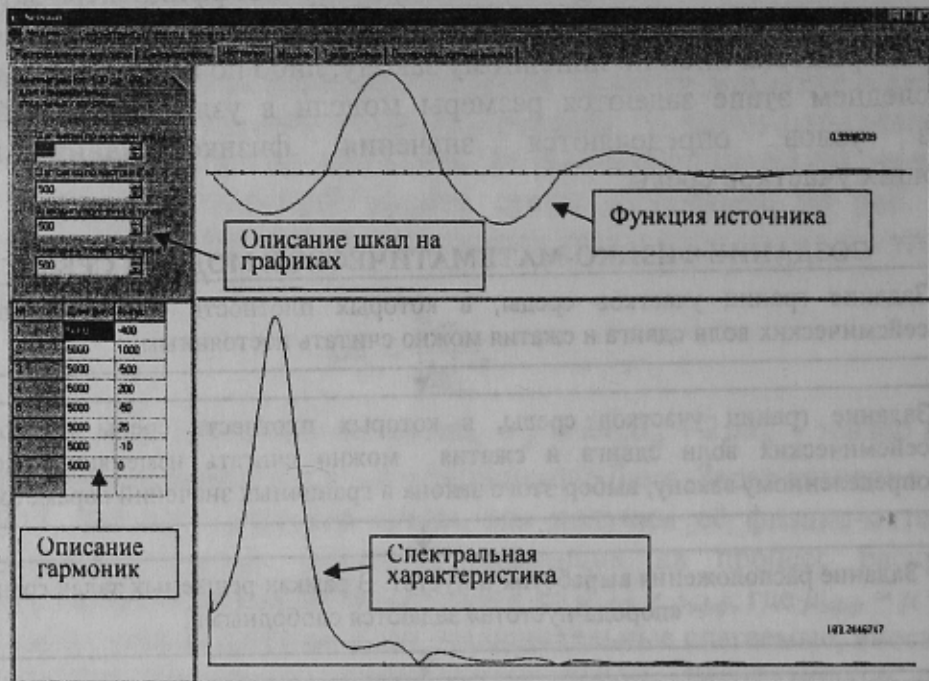


Рисунок 4 - Фрагмент работы модуля создания и апробации функции источника

Система наблюдений представляет собой наборы сейсмоприёмников. Для каждого из наборов задаётся число сейсмоприёмников (до 96) и их расположение. Число наборов не ограничено.

Перейдем к рассмотрению расчетных соотношений. Выражение (1) путем подстановки выражения для тензора напряжений можно записать в виде [7]:

$$\rho \ddot{u}_i = \frac{\partial \lambda}{\partial x_k} u_{||} \delta_{ik} + 2 \frac{\partial \mu}{\partial x_k} u_{ik} + \lambda \delta_{ik} \frac{\partial u_{||}}{\partial x_k} + 2 \mu \frac{\partial u_{ik}}{\partial x_k}$$

Если в выражение справа от знака равенства опустить первые два слагаемых, то получится известное уравнение Ламе, записанное для изотропной однородной среды и реализованное в [8]. Однако, данное упрощение правомерно только для ограниченного ряда моделей, в которых не присутствуют зоны плавного изменения физико-механических

характеристик среды [3,7]. Поэтому в рамках описываемого комплекта программ реализована возможность выбора. Пользователь может использовать как уравнения Ламе (выигрывая в быстродействии на упрощенных моделях), так и уравнения движения в общем виде (выигрывая в точности решения). Процесс расчета состоит из двух этапов. На первом этапе вычисляются все константы для расчетных соотношений для каждого из узлов расчетной решетки. На втором производится непосредственный расчет процесса распространения волнового поля. В узлах, соответствующих выработкам и пустотам, расчет не производится. Предусмотрена возможность использования различных расчетных соотношений для вычисления смещений в узлах, соответствующих различным участкам среды. В ходе расчета пользователь может наблюдать его ход и анализировать последовательные картины распределения амплитуды колебаний в пределах модели.

Блок анализа результатов моделирования содержит набор следующих процедур.

1) Процедура визуализации наборов теоретических сейсмограмм (см. рис. 5). При этом предусмотрен вывод сейсмограмм с использованием различных правил нормировки и коэффициентов усиления. Допускается как вывод информации по отдельным компонентам волнового поля, так и вывод информации по всем компонентам сразу. Автоматизирован процесс построения огибающих.

2) Спектральный анализ волновых пакетов и сейсмограмм в целом позволяет не только получать информацию о спектральных характеристиках волновых пакетов, но и производить частотную фильтрацию. При этом используются процедуры прямого и обратного БПФ. Данная процедура фильтрации может быть применена, в частности, для учета реального поглощения в среде по методу, изложенному в [7], поскольку позволяет использовать фильтры самой разнообразной конфигурации.

3) Скоростной анализ волновых пакетов позволяет анализировать информацию о скоростных характеристиках волновых пакетах а также проводить скоростную фильтрацию сейсмограмм. При этом предусмотрена возможность анализа как проходящих так и отраженных волн. В последнем случае пользователь задает наборы отражающих границ, формирующих исследуемые волновые пакеты.

4) Поляризационный анализ полезен для идентификации природы волновых пакетов, поскольку применяемые на практике в качестве инструментов типы сейсмических колебаний имеют существенно различные поляризационные характеристики [7]



Рисунок 5 - Фрагмент работы процедуры анализа и обработки теоретических сейсмограмм.

Комплект программ применяется специалистами УкрНИМИ как на этапе анализа априорной информации, так и на этапе анализа результатов натуральных экспериментов. В частности, проводится сопоставительный анализ результатов математического моделирования и результатов натуральных наблюдений с целью уточнения геометрической и физико-математической моделей углевещающей толщи. При этом (при необходимости) геометрические и физические модели среды могут уточняться по изложенной выше схеме. Могут проводиться повторные численные эксперименты для подтверждений (опровержений) тех идей, которые возникают при выработке окончательного прогноза. Данный комплект программ показал высокую эффективность при проведении исследований на ряде горных предприятий Украины (ш. «Красноармейская – Западная», ш. «Краснолиманская», ш. «Шашкова», ш. «Коммунист» и многие другие). Он является базовым программным средством для теоретического обоснования и апробации новых методик сейсморазведки (например, при исследовании возможности детектирования аномалий путем анализа волновых пакетов, отраженных от нижезалегающего горизонта).

Таким образом, в данной статье кратко описан комплект программ, решающий задачи моделирования процесса распространения сейсмических колебаний в толще пород. Комплект широко применяется в институте УкрНИМИ НАН Украины в рамках методик проведения исследований строения земной толщи. Описаны принципы, которые лежат в основе его структуры и ряд технологических решений, обеспечивающих его эффективное использование. Результаты данной статьи могут быть использованы специалистами в области проектирования программных средств, реализующих методы математического моделирования распространения сейсмических колебаний в земной толще, содержащей залежи полезных ископаемых.

Литература

1. Thomson W.J. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium // Journal of Appl. Phys. - 1950. - Vol.21. - P.89 - 93.
2. Kelly K.R., Ward R.W., Treitel S., Alford R.M. Synthetic Seismograms, a finite-difference approach // Geophysics. - 1976. - Vol.41. - P.2 - 27.
3. Korn M., Stock H. Reflection and transmission of love channel waves at coal seam discontinuities computed with a finite-difference method // Geophysics. - 1982. - Vol.50. - P.171 - 176.
4. Virieux J., Madariaga R. Dynamic faulting studied by a finite-difference method // Bull. Seism. Soc. Am. - 1982. - Vol.72. - P.345 - 369.
5. Глухов А.А., Захаров В.Н., Рубан А.Д. Моделирование волнового поля в задачах шахтной сейсморазведки методом конечных разностей/ Горный вестник, Москва, ИГД Скочинского, 1994, С.16-18
6. Анциферов А.В. Моделирование волнового поля в задачах шахтной сейсморазведки методом конечных разностей/ Збірник наукових праць №5 “Проблеми гірського тиску” 2001. С.5-15.
7. Анциферов А.В. Теория и практика шахтной сейсморазведки.- Донецк.: изд. «Алан», 2002, -312с.
8. Анциферов А.В., Захаров В.Н., Глухов А.А. Комплект программ моделирования процесса распространения сейсмических волн в угленосной толще // Каталог прогр. Средств / ГосФАП, М.1991, №50910000379
9. Захаров В.Н. Сейсмоакустическое прогнозирование и контроль состояния и свойств горных пород при разработке угольных месторождений. М.: ФГУП ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского, 2002.-172с.