

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ОТКЛИКА ОТ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

© А.И. Гончар, С.И. Донченко, Л.В. Нестеренко, А.И. Шундель, 2008

Научно-технический центр панорамных акустических систем НАН Украины, Запорожье

The model, which is examined in the given article, characterizes the process of receiving response on impulse effect from typical geological structures, located within coal-mining Ukrainian regions.

Моделирование сейсмического волнового поля можно рассматривать как один из подходов к интерпретации сейсмических данных, позволяющий подтвердить или опровергнуть построенную модель среды. На созданной модели можно изучать зависимость между ее физическими параметрами и сейсмическим волновым полем, т. е. наблюдать за изменениями волнового поля, обусловленными изменением параметров исходной модели среды.

Реальная среда, в которой распространяются сейсмические волны, очень сложная. Модель среды – это некоторое упрощенное представление геологического разреза. Для того чтобы моделирование волнового поля принесло пользу, надо найти компромисс между простотой описания модели и точностью отображения реальной геологической среды. Обычно модель задается в виде набора слоев с заданными параметрами, определяющими физические свойства каждого ее слоя. После того как модель задана, выполняется расчет сейсмического волнового поля. Любой вычислительный процесс – это приближенное и дискретное решение математических уравнений. Для моделирования сейсмических волн могут применяться уравнение упругости или волновое уравнение. Полученные сейсмические волновые поля сравниваются с реальными полями, зарегистрированными при полевых экспериментах. Сравнение реального и модельного полей позволяет сделать заключение о близости реальной геологической среды к той модели, которая была заложена в расчет модельного волнового поля.

Модель геологического разреза, предназначенная для расчета сейсмического волнового поля, должна содержать следующую информацию:

- данные о положении и геометрии отражающих границ;
- скорости распространения продольной и поперечной волн;
- плотности пород;
- форму сейсмического сигнала, возбуждаемого источником.

Точное задание всех геологических границ и их геометрии необходимо для совпадения модельного и наблюдаемого волновых полей.

В работах [1, 2] решена задача разработки аналитико-численных методов математического моделирования структуры и пространственного распределения акустических свойств геологической среды, представляющего собой слоистую среду. Разработанные методы позволяют создавать дискретные, непрерывные или смешанные структурно-акустические модели среды с учетом слоистости, флюидо- и газонасыщенности геологической среды, наличия в них полостей и включений разной формы и свойств.

Рассмотрим задачу о нахождении отклика от слоистой среды на импульсное воздействие.

Для того чтобы получить модельную сейсмическую трассу, надо рассчитать акустическую жесткость среды:

$$Z(H) = \rho(H)c(H),$$

где  $\rho$  – плотность среды;  $c$  – скорость звука в среде.

Запишем уравнение излученного импульса:

$$P(t) = \left[ 2^{-\exp\left(-\alpha\left(t-\frac{\tau}{2}\right)\right)} \cdot 2^{-\exp\left(-\alpha\left(\frac{\tau}{2}-t\right)\right)} \right] P_0 \cdot \exp(i2\pi ft + \varphi_0), \quad (1)$$

где  $\tau$  – длительность импульса;  $f$  – несущая частота;  $\varphi_0$  – начальная фаза;  $t$  – время;  $P_0$  – максимальная амплитуда излучаемого импульса;  $\alpha$  – коэффициент, определяющий форму огибающей излучаемого импульса.

Необходимо определить коэффициенты отражения для каждого слоя многослойной среды. Используя формулы для расчета коэффициентов отражения, рассчитываем коэффициенты отражения  $V_{1n}$  ( $n$  – число слоев) для каждого слоя [4]:

$$V_{1n} = \frac{V_{12} + V_{2n} \exp(-2i\hat{O}_2)}{1 + V_{12}V_{2n} \exp(-2i\hat{O}_2)},$$

$$V_{(n-m)n} = \frac{V_{(n-m)(n-m-1)} + V_{(n-m-1)n} \exp(-2i\hat{O}_{n-m-1})}{1 + V_{(n-m)(n-m-1)}V_{(n-m-1)n} \exp(-2i\hat{O}_{n-m-1})},$$

$$\hat{O}_n \equiv \frac{\omega}{c_n} d_n \cos \theta_n,$$

$$V_{(m-1)m} = \frac{\rho_m c_m \cos \theta_{m-1} - \rho_{m-1} c_{m-1} \cos \theta_m}{\rho_m c_m \cos \theta_{m-1} + \rho_{m-1} c_{m-1} \cos \theta_m},$$

где  $\omega$  – циклическая частота;  $c_n$  – скорость звука в  $n$ -м слое;  $d_n$  – толщина  $n$ -го слоя;  $\theta_n$  – угол падения волны на  $n$ -ю границу раздела.

Полученные коэффициенты отражений необходимо трансформировать во временной масштаб функции  $V(t)$ , т. е. определить время прихода отраженного сигнала от каждого слоя. Скорость распространения звуковой волны в каждом из них различна, поэтому время движения волны в каждом слое рассчитывается по формуле

$$t_i = \frac{2d_i}{c_i} \quad (2)$$

где  $d_i$  – толщина  $i$ -го слоя;  $c_i$  – скорость звука в  $i$ -м слое.

Коэффициент 2 в формуле (2) учитывает движение в прямом и обратном направлениях; получается, что волна проходит двойное расстояние. Трансформировав коэффициенты отражения во временной масштаб, можем получить отклик от слоистой среды. Он представляет собой суперпозицию всех сейсмических сигналов, отраженных от геологических границ, которые характеризуются различными коэффициентами отражения. Сейсмическая трасса может быть описана так называемой сверточной моделью.

Формула для отклика имеет следующий вид [5]:

$$R(t) = (P(t) \otimes V(t)) = \int P(\tau) V(t - \tau) dt \quad (3)$$

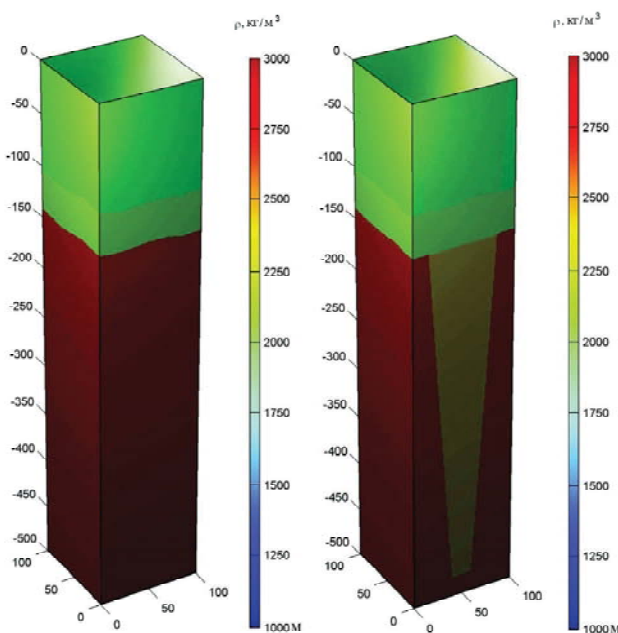


Рис. 1. Геологическая модель невыработанного (не тронутого) участка земной толщи грунта и возможного подтопления территорий в зоне влияния закрывающихся шахт

или, если перейти к спектрам:

$$R(t) = F^{-1} \{ F[P(t)] \cdot F[V(t)] \}, \quad (4)$$

где  $F$  – прямое преобразование Фурье;  $F^{-1}$  – обратное преобразование Фурье.

В качестве примера рассмотрим модели геологических сред: *первая модель* – геологическая среда без подработок (рис. 1); первый слой (около 100 м) – зона малых скоростей, определяется следующими параметрами: плотность  $\rho = 2000$  кг/м<sup>3</sup>, скорость звука  $c = 1600$  м/с; второй слой (около 50 м) – зона пониженных скоростей, определяется следующими параметрами:  $\rho = 2200$  кг/м<sup>3</sup> и  $c = 2400$  м/с; третий слой – угленосная толща, ее параметры:  $\rho = 2650$  кг/м<sup>3</sup> и  $c = 3380$  м/с; *вторая модель* – возможное подтопление территорий в зоне влияния закрывающихся шахт. На рис. 2 показаны характерные зоны для данной модели. В зоне возможного подтопления скорость  $V_p^2$  либо равна скорости  $V_p^1$ , либо больше на 20 % вследствие повышения уровня грунтовых вод и общего увлажнения массива покровных отложений. В зоне пониженных скоростей ( $V_p^3$ ) предположительно особых измерений не произойдет, поскольку на участках влияния подработки она, вероятно, попадет в зону депрессионной воронки. В целом в массиве углевещающих пород, попадающем в зону влияния горных работ и, соответственно, развития (вследствие откачки воды) депрессионной воронки, скорость распространения продольных волн будет занижена в сравнении со скоростью в массиве пород, находящемся за пределами влияния подработки в естественно увлажненном состоянии, т.е.  $V_p^5 \leq V_p^4$  примерно на 20 % [3].

Двигаясь вдоль любого направления в геологической модели, можно получить временной разрез структуры. В данной модели получения отклика считается, что ослабление сигнала при затухании в среде компенсируется ВАРУ, т.е. используется приближение геометрической акустики в средах без затухания звука.

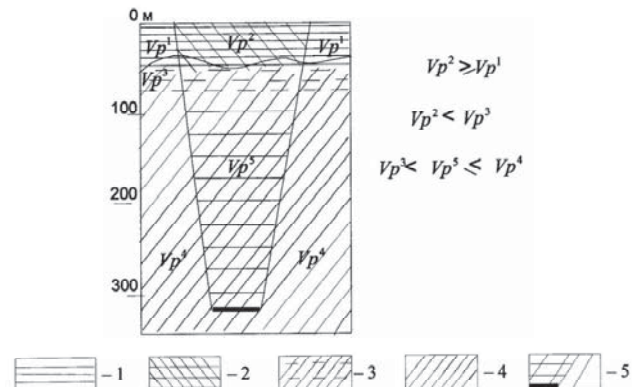


Рис. 2. Геологическая модель возможного подтопления территорий в зоне влияния закрывающихся шахт: 1 – покровные отложения, зона малых скоростей; 2 – зона возможного подтопления; 3 – зона пониженных скоростей выветренного карбона; 4 – угленосная толща (не подработанная); 5 – зона влияния отработанного пласта

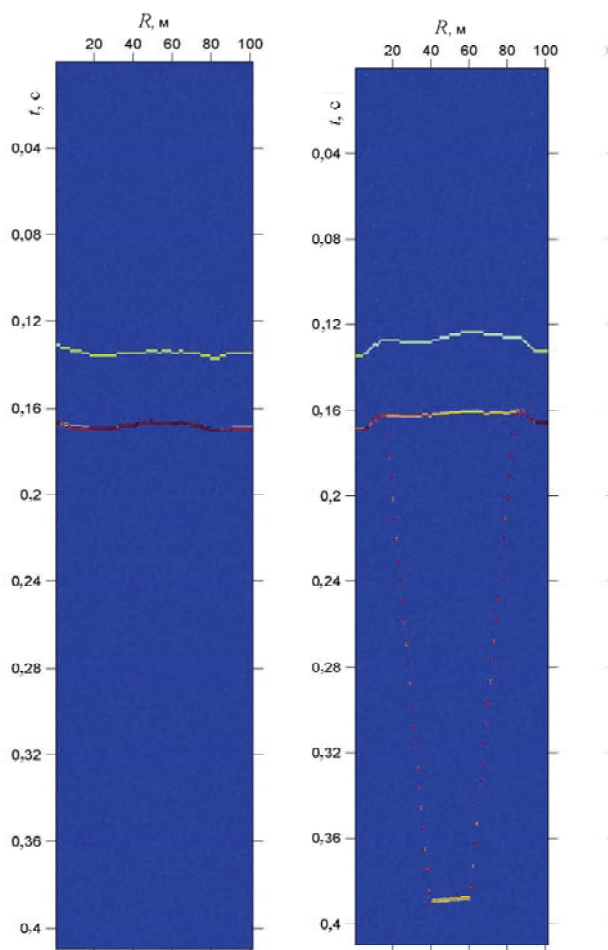


Рис. 3. Акустический отклик от приведенных моделей на рис. 1

Примеры построения дискретных структурно-акустических моделей дна и полученные отклики от этих моделей на импульсное воздействие с помощью изложенной концепции, показаны на рис. 1, 3. На отклике от нетронутой модели видны границы залегания слоев, а на отклике от модели возможного подтопления территорий в зоне влияния закрывающихся шахт кроме слоев залегания просматриваются характерные зоны для данной модели (рис. 3). Синтез моделей и получение отклика проводились в среде Matlab v.7.0.1.24704 Release 14 Service Pack 1 с помощью специализированных script-функций и GUI-оболочки. Для последующего использования синтезированных моделей сохранялись пространственные спектры их структурных элементов.

Очень часто ошибки в исходных данных не позволяют добиться абсолютного сходства модельного и реального волновых полей. Поэтому сложно использовать модельные отклики для численных оценок и построения зависимостей амплитуд от параметров геологической модели. Но даже качественная информация о связи акустического волнового поля с физическими параметрами пластов может принести ощутимую пользу при интерпретации данных профилирования.

Полученные временные разрезы структуры дают возможность апробировать, совершенствовать и проводить отладку алгоритмов распознавания и стратификации структуры среды. Разработка подобных моделей нужна для прогнозирования изменения структуры земной коры вследствие влияния техногенных и природных факторов, для разработки новых и усовершенствования существующих методов обнаружения экологически опасных зон и объектов. Для полного решения вопроса необходимы масштабные численные эксперименты и доводка алгоритмов синтеза пространственных распределений акустических свойств элементов моделируемых сред и алгоритмов синтеза отклика [3].

1. *Математическое моделирование пространственной структуры геофизических сред и оценка возмущений акустических полей, обусловленных наличием локализованных структурных аномалий: (Отчет по НИР) / НТЦ ПАС НАН Украины. – № ГР 0105U004526. – Запорожье, 2005. – 150 с.*
2. *Гончар А.И., Шлычек Л.И., Шундель А.И., Писанко И.Н. Создание структурно-акустических моделей морского дна // Гідроакустичний журнал (проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану): Зб. наук. праць Наук.-техн. центру панорамних акустичних систем НАН України. – Запоріжжя, 2004. – Вип. 1. – С. 13–21.*
3. *Создание теоретических основ моделирования пространственной структуры сред с учетом геофизических полей в нестационарной постановке: (Отчет по НИР) / НТЦ ПАС НАН Украины. – № ГР 0107U004017. – Запорожье, 2007. – 80 с.*
4. *Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1957. – 502 с.*
5. *Кири П., Брукс М. Введение в геофизическую разведку. – М.: Мир, 1988. – 382 с.*

Поступила в редакцию 03.03.2008 г.