

Математическое моделирование поверхности-фундамента горного предприятия при сейсмическом воздействии

Е.В. Бегус, В.Б. Заалишвили, Ж.Д. Гуаева

Геофизический центр экспериментальной диагностики Владикавказского научного центра РАН и Правительства РСО-А

Известно, что сейсмическая безопасность общества обеспечивается путем значительного сокращения числа жертв и уменьшения ущерба от природных и техногенных землетрясений. Горные предприятия Северного Кавказа, как правило, расположены в зоне высокой сейсмической опасности, подлежат оценкам сейсмического риска наравне с другими системами человеческой жизнедеятельности (градо-строительство, системы жизнеобеспечения и т.д.). В работе представлено моделирование деформаций поверхности-фундамента горного предприятия при возможном сейсмическом воздействии, если слагающая грунт толща представляет собой слоистую прямоугольную область с упругими свойствами с неоднородными включениями. Неоднородные включения представляют горные выработки различной плотности.

Рассматривается двумерное волновое уравнение вида

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2(x, z)} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

в прямоугольной области $\Omega = \{(t, x, z): 0 \leq t \leq T, 0 \leq z \leq h, 0 \leq x \leq L\}$

Задача решается при нулевых начальных данных:

$$u|_{t=0} = \frac{\partial u}{\partial t}|_{t=0} = 0. \quad (2)$$

Граничные условия (на свободной поверхности задаются нулевые напряжения):

$$\frac{\partial u}{\partial z}|_{z=0} = 0 \quad (3)$$

Источник с координатами $x=0, z=h$ задается граничным условием: $\frac{\partial u}{\partial z}|_{z=h} = u_0(t)$, где

$$u_0(t) = u_0 \cdot \left[\left[\frac{\pi(t-t_0)}{t_0} \right]^2 - \frac{1}{2} \right] e^{-\left[\frac{\pi(t-t_0)}{t_0} \right]^2}. \quad (4)$$

На боковых гранях: $\frac{\partial u}{\partial x}|_{x=0} = \frac{\partial u}{\partial x}|_{x=L} = 0. \quad (5)$

Функция $v(x, z)$ является кусочно-постоянная двух координат x и z :

$$v(x, z) = \begin{cases} v_2, & a < z < b, \quad c < x < d \\ v_1, & 0 \leq z \leq a, \quad b \leq z \leq h, \quad 0 \leq x \leq c, \quad d \leq x \leq L \end{cases}$$

К данной задаче применяется аналитико-численный метод [1], основанный на комбинации конечных интегральных преобразований Фурье по переменной x и метода линейной факторизации.

Пусть $V(z, n, t) = \int_0^L u(z, x, t) \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx, \quad (6)$

тогда $u(z, x, t) = \frac{1}{L} V(z, 0, t) + \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} V(z, n, t) \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right).$

Будем рассматривать волновое поле до момента $t \leq T$, где T – минимальное время распространения переднего фронта волны до отражающих поверхностей $x=L, z=0$.

В результате интегрального косинус-преобразования (6) задача (1)-(5) в терминах новой функции запишется в виде:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} - p_n^2 V = \sum_{k=0}^N c(k, n, z) \frac{\partial^2 V(z, k, t)}{\partial t^2}, \quad (7)$$

$$V|_{t=0} = \frac{\partial V}{\partial t}|_{t=0} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial V}{\partial z}|_{z=0} = 0, \quad \frac{\partial V}{\partial z}|_{z=h} = \int_0^L u_0(t) \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx. \quad (9)$$

$$\text{Здесь } p_n^2 = \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2, \quad c(k, n, z) = \int_0^L \frac{1}{v^2(x, z)} \cos\left(\frac{k\pi x}{L} \right) \cos\left(\frac{n\pi x}{L} \right) dx.$$

$$\text{Пусть } b_n(t) = \int_0^L u_0(t) \cos\left(\frac{n\pi x}{L} \right) dx.$$

Задача (7)-(9) может быть представлена в векторном виде:

$$\frac{\partial^2 \vec{V}}{\partial t^2} = C^{-1} \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} - P \right) \vec{V} \quad (10)$$

$$\vec{V}_{t=0} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \Big|_{z=h} = 0, \quad \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \Big|_{z=0} = \vec{B}. \quad (12)$$

$$\text{Здесь } \vec{V}(z, t) = (V(z, k_0, t), V(z, k_1, t), \dots, V(z, k_N, t))^T,$$

$$P = \text{diag}(p_0^2, p_1^2, \dots, p_N^2), \quad \vec{B} = (b_0(t), b_1(t), \dots, b_N(t))^T,$$

$$C = \begin{pmatrix} c(0,0,z) & c(1,0,z) & \dots & c(N,0,z) \\ c(0,1,z) & c(1,1,z) & \dots & c(N,1,z) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c(0,N,z) & c(1,N,z) & \dots & c(N,N,z) \end{pmatrix}$$

Для решения (10)-(12) воспользуемся конечно-разностной аппроксимацией по координатам z и t . Вводится равномерная сетка $\{(z_i, t_j) = ((i-1)\tau, (j-1)\eta); i = 1, \dots, M+1; j = 1, \dots, \Omega+1; h = M\tau; T = \Omega\eta\}$. Тогда выражения (10)-(12) в конечных разностях примут вид:

$$\frac{\vec{V}_i^{j+1} - 2\vec{V}_i^j + \vec{V}_i^{j-1}}{\eta^2} = C^{-1} \left(\frac{\vec{V}_{i+1}^{j+1} - 2\vec{V}_i^{j+1} + \vec{V}_{i-1}^{j+1}}{\tau^2} - P\vec{V}_i^{j+1} \right) \quad (13)$$

$$\vec{V}_i^0 = 0, \quad \vec{V}_i^1 = \vec{V}_i^0 \quad (14)$$

$$\vec{V}_{M-1}^j = \vec{V}_M^j + \vec{B}\tau, \quad \vec{V}_0^j = \vec{V}_1^j \quad (15)$$

Задача (13)-(15) решается с помощью метода линейной факторизации по переменной z [2]. Вектор-функция $\vec{V}(z, t)$ ищется в виде $\vec{V}_i^{j+1} = A_{i+1} \vec{V}_{i+1}^{j+1} + B_{i+1}$ (16), где коэффициенты A_{i+1}, B_{i+1} неизвестны. Для их нахождения выражение $\vec{V}_{i-1}^{j+1} = A_i \vec{V}_i^{j+1} + B_i$ подставляется в (13) и приводится к виду (16). Коэффициенты при вектор-функции $\vec{V}(z, t)$ приравниваются, и мы получаем рекуррентные соотношения для A_{i+1}, B_{i+1} (прямой ход), $i = 1, \dots, M-1$. Затем вычисляются компоненты вектор-функции \vec{V}_i^{j+1} , $i = M-1, \dots, 1$ (обратный ход). Прямой и обратный ход осуществляются на каждом временном слое.

Расчет смещения грунтовой толщи на поверхности $z=h$ представлен на рис. 1 при размерах неоднородного включения $a=5\text{м}, b=8\text{м}, c=10\text{м}, d=30\text{м}, L=40\text{м}, T=20\text{сек.}$, были взяты два профиля $x = 20\text{м}$ – рыхлая неоднородность (ряд 2), $x=5\text{м}$ – скала (ряд 1).

Продольная волна, распространяющаяся к поверхности из скального основания, попадает в слой песка и скорость ее распространения при этом снижается от 1200 м/с до 200 м/с. Расчеты показали, что амплитуда колебаний, при этом, возрастает в три раза, что, согласно сейсмической шкале, соответствует увеличению интенсивности на 1,5 балла. Этот вывод находится в хорошем соответствии с законом сохранения энергии.

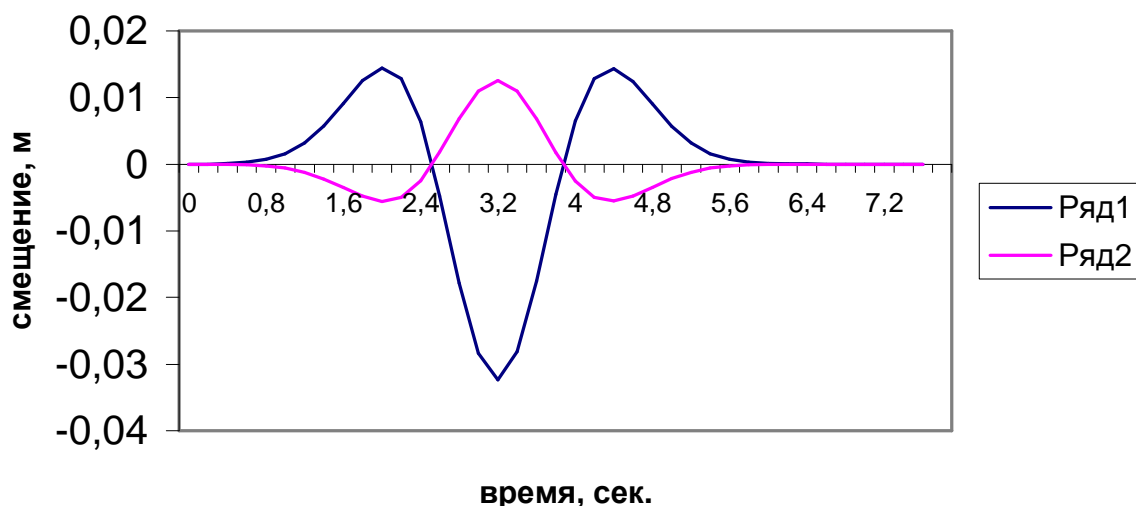


Рис.1 График колебания смещения грунтовой толщи

Полученные результаты численного эксперимента являются основой для их использования в целях сейсмического микрорайонирования территорий и сейсмостойкого строительства горных предприятий.

Литература

1. Конюх Г.В., Михайленко Б.Г. Комплексирование метода прямых и конечных интегральных преобразований при решении прямых динамических задач сейсмоки. Сб. докладов VII Всероссийской школы-семинара «Современные проблемы математического моделирования». Изд-во РГУ, Ростов-на-Дону, 1997г., с.66-70.
2. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. Москва, «Наука», 1989 г.

Интернет-портал «Геология»: принципы работы и архитектура

В.М. Ряховский¹, Н.Ю. Щульга², А.М. Асавин³

¹Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН

²Межведомственный суперкомпьютерный центр РАН

³Институт геохимии и аналитической химии РАН

Информационная поддержка научных исследований в настоящее время представляет собой отдельную задачу, требующую решения на стыке информатики и методологии естественных наук о Земле. Основной особенностью наук о Земле является пространственная детерминированность данных, в основе которых лежат географические объекты различного масштаба от локального геологического тела до Земного шара в целом. Задачей информатики при этом становится синтез и интегральный анализ большого объема многоаспектных пространственных данных и сопоставление результатов исследований для выявления общих закономерностей геологических процессов в пространственно-временных координатах на локальном, региональном и глобальном уровнях. Для решения поставленных задач необходимо привлекать достижения современных геоинформационных технологий – распределенные ГИС, представляющие собой распределенные базы данных, распределенные вычисления, и стандарты взаимодействия открытых систем, а также создание на специализированных порталах инфраструктуры пространственных данных (ИПД). Именно ИПД позволит решить проблемы электронного обмена пространственными данными между порталами разной специализации, а также обеспечит массовый доступ к картографическим материалам на основе современных информационно-коммуникационных технологий (Интернет). Развитие этих направлений приведет к снижению дублирования работ за счет автоматизации координации пользователей и приведет к более рациональному использованию информационных потоков.

В настоящее время под электронной геологической картой подразумевается «базы данных». Изменились методы представления геологической информации, методы доступа к ней, методы обработки и визуализации. Теперь карта это даже не многослойная конструкция из шейп-файлов или слоев SDE, а динамичное изображение, собираемое из различных источников (порталов) по всему миру. В последнее десятилетие в США и других странах для ИПД разработаны необходимые стандарты и соответствующее программное обеспечение, что дает возможность перейти от решения частных задач к обобщенному видению проблемы. Однако, в своем традиционном виде геологическая карта отнюдь не потеряла своего значения, но ускорение информационных потоков и их расширение в настоящее время требует принципиально новых способов обработки информации. Исследователь с одной стороны должен оператив-