

Численное моделирование распространения вибросейсмических волн в средах характерных для грязевых вулканов*

Б.М. ГЛИНСКИЙ

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

e-mail: gbm@org.sssc.ru

Д.А. КАРАБАЕВ

e-mail: kda@org.sssc.ru

Работа посвящена математическому моделированию распространения упругих волн от точечного источника в трехмерных упругих средах, характерных для грязевых вулканов. Разработан алгоритм, создан комплекс параллельных программ и проведены тестовые расчеты по выбору оптимальной схемы распараллеливания на кластерах Сибирского Суперкомпьютерного Центра СО РАН. Впервые представлена математическая модель грязевого вулкана “Гора Карabetова”, приводятся результаты численного моделирования и сравнение полевого вибросейсмического и численного экспериментов.

1. Постановка задачи

Численное моделирование распространения сейсмических волн в сложно построенных упругих неоднородных средах проводится на основе полной системы уравнений теории упругости с соответствующими начальными и граничными условиями. Данная постановка задачи представлена в терминах вектора скоростей смещений $\mathbf{u} = (U, V, W)^T$ и тензора напряжений $\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz})^T$:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = [A] \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{F}(t, x, y, z), \quad \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}}{\partial t} = [B] \mathbf{u},$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} (\lambda + 2\mu) \frac{\partial}{\partial x} & \lambda \frac{\partial}{\partial y} & \lambda \frac{\partial}{\partial z} \\ \lambda \frac{\partial}{\partial x} & (\lambda + 2\mu) \frac{\partial}{\partial y} & \lambda \frac{\partial}{\partial z} \\ \lambda \frac{\partial}{\partial x} & \lambda \frac{\partial}{\partial y} & (\lambda + 2\mu) \frac{\partial}{\partial z} \\ \mu \frac{\partial}{\partial y} & \mu \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ \mu \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \mu \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & \mu \frac{\partial}{\partial z} & \mu \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix}$$

с начальными условиями: $U(x, y, z, t)|_{t=0} = 0$, $V(x, y, z, t)|_{t=0} = 0$, $W(x, y, z, t)|_{t=0} = 0$ и граничными условиями: $\sigma_{xz}|_{z=0} = 0$, $\sigma_{yz}|_{z=0} = 0$, $\sigma_{zz}|_{z=0} = 0$.

В данной постановке $\lambda(x, y, z)$, $\mu(x, y, z)$ – параметры Ламе.

Предполагается, что плотность ρ зависит от трех пространственных переменных и правая часть (массовая сила) может быть представлена в виде:

$$\mathbf{F}(t, x, y, z) = F_x \mathbf{i} + F_y \mathbf{j} + F_z \mathbf{k}.$$

*Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований №4.5, ИП СО РАН №26, 133, Мин-ва образ. и науки №14.740.11.0350.

2. Метод решения задачи

Метод решения поставленной задачи основан на использовании конечно-разностного метода. Алгоритм построения конечно-разностной схемы предложен в статье [1]. Аналогичный подход для статических задач теории упругости, также, был развит в работах отечественных математиков [2]. Расчет сеточных коэффициентов (λ , μ , ρ , которые могут иметь разрывы) участвующих в разностной схеме проводится на основе интегральных законов сохранения.

Конечно-разностная схема имеет второй порядок аппроксимации по времени и пространству [1].

Общая схема вычислений выглядит следующим образом.

На первом полушаге по времени определяются компоненты вектора скорости смещения, затем на втором полушаге по времени по формулам находятся нужные компоненты напряжений. Далее насчитываются новые компоненты образов вектора скорости смещения на новом полушаге по времени.

3. Реализация “построителя” трехмерной модели упругой среды

Для выполнения данной работы был создан специализированный построитель трехмерных моделей неоднородных упругих сред. С помощью разработанного построителя задаются значения λ , μ , ρ в каждой точке конечно-разностной схемы.

В нашем случае предполагается, что задана крупноблочная модель среды, составленная из параллелепипедов, в вершинах которых задаются параметры среды (Vp , Vs , ρ). Эти параметры являются непрерывными внутри каждого блока. Разрывы проходят только по граням соседних параллелепипедов. Далее происходит интерполяция параметров среды на более “мелкую” расчетную сетку.

После того как построена основная сеточная модель трехмерно-неоднородной упругой среды возможно дальнейшее усложнение ее геометрической структуры. В построенную модель можно “вставлять” различные геометрические объекты, которые имеют аналитическое описание (цилиндрические, конические, эллипсоидальные и др. подобласти, или их пересечение) со своими упругими параметрами среды.

Разработанный построитель модели позволяет конструировать сложные 3D модели неоднородных упругих сред, близкие к реальным объектам исследования.

4. Параллельная реализация и исследование времени работы программы

Одно из основных требований к параллельной программной реализации состояло в том, чтобы программа могла бы эффективно работать на кластерах с MPP-архитектурой и высокопроизводительных SMP-серверах.

Использован способ разбиения расчетной области на слои вдоль одной из пространственных переменных, в данном случае вдоль координатной оси . При реализации данной схемы каждый вычислительный узел рассчитывает свою сеточную область на каждом временном шаге независимо от других, за исключением точек, находящихся на границе между двумя соседними областями. Эти точки являются общими для каждой

из областей и для продолжения счета необходимо производить обмен информацией об искомым величинах между “соседями”.

На основе выбранной схемы были созданы две параллельные программы:

- для распараллеливания используется только MPI,
- используется комбинация возможностей MPI и OpenMP (“гибридная параллельная схема”, MPI&OMP).

Во втором случае (“гибридная параллельная схема”), предлагается проводить обмен информацией между соседними слоями через MPI, а внутри каждого слоя, расположенного в общей памяти узла, проводить параллельные вычисления, используя OpenMP. Количество слоев для “гибридной” схемы определяется числом используемых вычислительных узлов, а количество OpenMP потоков – количеством ядер на узлах, в случае MPI программы – общим количеством ядер на выделенных вычислительных узлах. На каждом временном шаге моделирования необходимо произвести две серии обменов информацией о волновом поле: одна – для компонент вектора скоростей смещений, вторая – для компонент тензора напряжений. Весь обмен информацией реализован через интерфейс MPI с помощью блокирующих операций получения и передачи данных.

Использовались различные опции Intel MPI для гибридных MPI/OpenMP приложений:

node – все логические процессоры на одном узле рассматриваются как единое пространство,

sock – каждый физический socket – отдельная область.

Исследование работы параллельных реализаций проводилось для двух тестовых моделей с количеством узлов по переменным $X \times Y \times Z \times \text{Time}$. Модель 1: $1537 \times 512 \times 1025 \times 1786$, Модель 2: $1025 \times 512 \times 1537 \times 1786$.

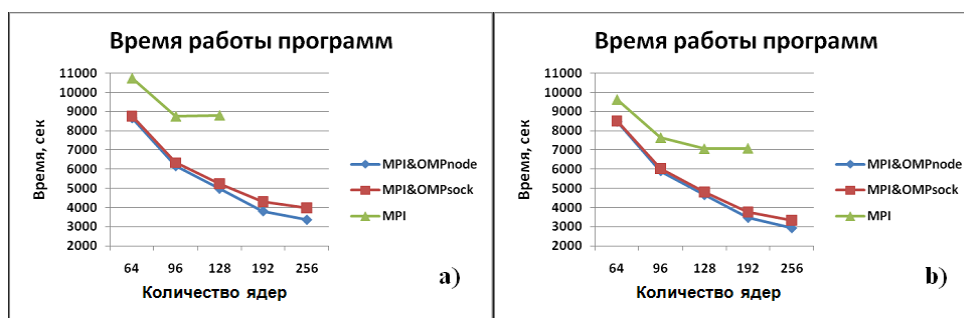


Рис. 1. Время работы параллельных программ а) для модели 1 и б) для модели 2.

На представленных графиках (рис. 1) видно, что при увеличении ресурсов все параллельные программы дают определенный выигрыш. В целом при увеличении количества ядер в два раза время выполнения на моделях 1 и 2 изменяется в среднем в 1.6–1.7 раза для “гибридной параллельной схемы”, и в 1.2–1.3 для MPI программы.

Использование опции “node” дает преимущество, по сравнению с опцией “sock”, при использовании “гибридной параллельной схемы”, выигрыш составляет в среднем 8% для

модели 1 и 5% для модели 2 (на 256 ядрах до 18% для модели 1 и до 13% для модели 2). Видно, что наилучший результат получается при использовании “гибридной параллельной схемы” с опцией “node”, по сравнению с MPI программой время вычислений изменяется до 1.7 раз на 128 ядрах для модели 1 и до 2 раз на 192 ядрах для модели 2. Отметим, что при значительном увеличении количества ядер (MPI потоков), MPI программа не дает прироста, в то время как, MPI&OpenMP программа дает прирост на том же количестве ядер.

Таким образом, при данной архитектуре кластера НКС-30Т наиболее лучшей в использовании является MPI&OpenMP программа (“гибридная параллельная схема”).

5. Экспериментальные исследования грязевого вулкана “Гора Карabetова” вибросейсмическими методами.

ИВМиМГ СО РАН поставил ряд экспериментальных работ по просвечиванию грязевых вулканов вибросейсмическими методами [3]. В экспериментальных работах по активному вибросейсмическому просвечиванию грязевого вулкана “Гора Карabetова” использовался сейсмический вибрационный источник СВ-10/180 и регистрирующие комплексы RefTek-125A (40 регистраторов с вертикальными сейсмоприемниками GeoSpace GS-20DX. Общая схема зондирования вулкана приведена на рис. 2. Отметим, что геологическая структура вулкана имеет очень сложное строение [5].

Излучение сигналов вибраторами осуществлялось в точках Т1-Т11. Длина профиля через вулкан, на котором производилась регистрация вибросейсмических сигналов, составила 3.2 км. В данной работе анализировалось поле от источников Т1, Т8.

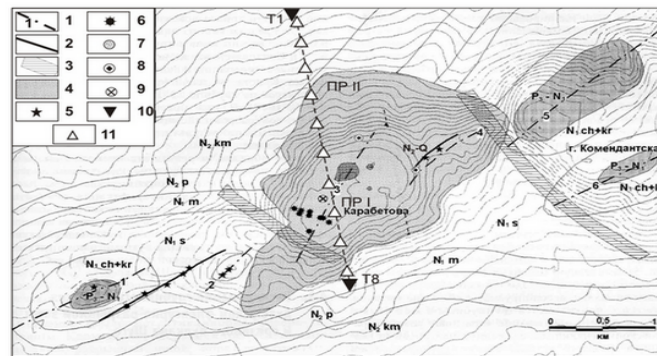


Рис. 2. Общая схема зондирования грязевого вулкана “Гора Карabetова”

В качестве зондирующих сигналов вибратора использовались свип-сигналы в диапазоне частот 10–64 Гц (сигнал с линейной разверткой частоты в данном диапазоне с длительностью 60 с). Синхронизация по времени регистрирующих систем и вибратора осуществлялась при помощи GPS-приемников.

Полученный полевой материал обрабатывался с помощью специальных программ. Были получены корреляционные сейсмограммы и проекции спектрально-временных функций, пример рис. 3.

Временная структура волнового поля характеризуется усложнением по мере приближения к телу вулкана. Спектральный анализ вибрационных сейсмограмм (коррелограмм) на этом профиле показывает довольно сложную картину прохождения сейсмических волн через тело вулкана.

По мере приближения к центру вулкана появляются более высокие частоты. Спектр существенно расширяется (рис. 3а), на некоторых расстояниях появляются узкополосные пики, возможно, связанные с резонансными свойствами скопления ранее действовавших сальз и грифонов (выходящие на поверхность каналы в виде конусов – грифоны или небольших углублений – сальзы, через которые извергаются грязевые и газообразные фракции вулкана). Однако, в центре вулкана, на расстоянии 1480 м от источника Т8 появляется узкополосный спектральный пик на частоте 25–28 Гц (рис. 3б), который может быть связан с геометрией центрального канала трубки вулкана и с резонансными свойствами этого выводящего канала. Для подтверждения этой гипотезы было проведено численное моделирование.

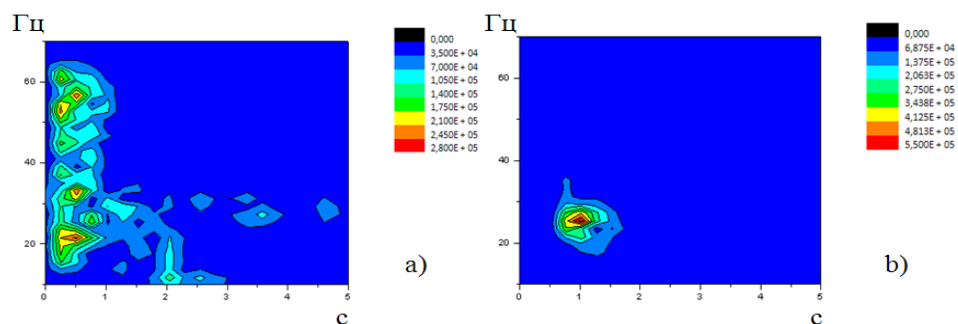


Рис. 3. Проекция СВФ на удалении: а) 740 м от источника (район скопления грифонов) б) 1480 м от источника (центр вулкана)

На этих рисунках по горизонтали обозначено время в секундах, по вертикали частота в Герцах, цветовая шкала отображает амплитуду спектра в относительных единицах.

6. Результаты численного эксперимента на модели “Гора Карabetова”

Для изучения динамики сейсмического поля и влияния геометрии модели на структуру волнового поля была построена трехмерная модель верхней части грязевого вулкана “Гора Карabetова”(рис. 4).

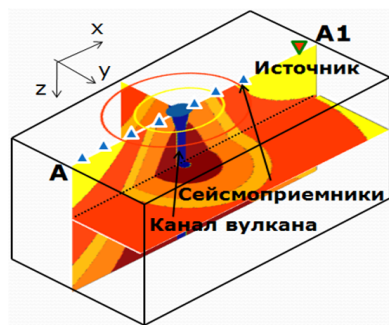


Рис. 4. 3D модель строения верхней части грязевого вулкана

В качестве источника сейсмических волн был взят источник типа “центр давления” с несущей частотой 25 Гц, расположенный вблизи свободной поверхности. Численное

моделирование проводилось на кластере НКС-30Т ССКЦ ИВМиМГ СО РАН (вычислительные блэйд-сервера hpProLiant BL2x220c G5). Сеточная модель представлена следующим количеством узлов по пространственным переменным: $X - 2096$, $Y - 1103$, $Z - 828$, $Time - 12415$. Размеры области моделирования составили $3.8 \text{ км} \times 2.0 \text{ км} \times 1.5 \text{ км}$. Результаты расчетов с помощью разработанных программ представлены в виде снимков волнового поля по профилю А–А1 (рис. 4) для компоненты W в плоскости XZ для различных временных промежутков $t1, t4$ на рис. 5.

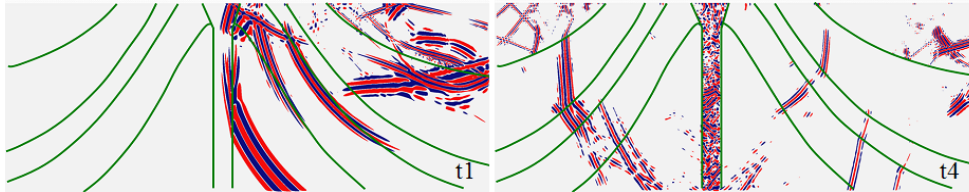


Рис. 5. Снимки волнового поля (результаты расчетов)

7. Заключение

Анализ СПФ по профилю, пересекающему зону вулкана “Гора Карabetова” и численное моделирование, основанное на геометрических особенностях этого вулкана, показало следующее: в спектрах вибрационных сейсмограмм на фоне их широкополосной части появляются узкополосные составляющие, характеризующие селективные свойства среды с выраженной неоднородностью, вероятно, это связано с мелкими подводными каналами, питающими действующие сальзы и грифоны и резонансными свойствами этих каналов на соответствующих частотах. Особенно выделяется узкополосный пик над центральной частью вулкана на частотах 25–28 Гц. Проведенные численные расчеты подтверждают, что этот пик связан с геометрией центрального канала вулкана и его резонансом.

Список литературы

- [1] Глинский Б.М., Караваев Д.А., Ковалевский В.В., Мартынов В.Н. Численное моделирование и экспериментальные исследования грязевого вулкана “Гора Карabetова” вибросейсмическими методами // Вычислительные методы и программирование. 2010. Т. 11, Москва, с. 95–104.
- [2] Коновалов А.Н. Сопряженно-факторизованные модели в задачах математической физики // Сиб. журн. вычисл. математики / РАН. Сиб. отд-ние.– Новосибирск, 1998. Т. 1, № 1. С. 25–57.
- [3] Глинский Б.М., Собисевич А.Л., Фатьянов А.Г., Хайретдинов М.С. Математическое моделирование и экспериментальные исследования грязевого вулкана Шуго // Вулканология и сейсмология. 2008. № 4. С. 1–9.
- [4] Глинский Б.М., Собисевич А.Л., Хайретдинов М.С. Опыт вибросейсмического зондирования сложно построенных геологических структур (на примере грязевого вулкана Шуго) // Докл. РАН. 2007. Т. 413, № 3. С. 398–402.
- [5] Шнюков Е.Ф., Шереметьев В.М., Маслаков В.А. и др. Грязевые вулканы Керченско-Таманского региона. – Краснодар: ГлавМедиа, 2006. С. 176.