

УДК 519.688

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНА “ГОРА КАРАБЕТОВА” ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Б. М. Глинский¹, Д. А. Караваев¹, В. В. Ковалевский¹, В. Н. Мартынов¹

Разработан алгоритм, создан комплекс параллельных программ и проведены тестовые расчеты по выбору оптимальной схемы распараллеливания на кластерах Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН. Проведено математическое моделирование распространения упругих волн от точечного источника в моделях трехмерных упругих сред, характерных для грязевых вулканов. Приводятся результаты обработки данных вибросейсмического эксперимента на грязевом вулкане “Гора Карабетова”. Сравниваются результаты численного и натурального экспериментов. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (коды проектов 07–05–00858, 07–07–00214, 09–07–12075), проектов СО РАН № 16.5, ИП СО РАН № 133 и № 26. Статья подготовлена по материалам доклада авторов на международной конференции “Параллельные вычислительные технологии” (ПаВТ-2010; <http://agora.guru.ru/pavt>).

Ключевые слова: 3D моделирование, комплекс параллельных программ, сейсмические поля, упругая среда, грязевый вулкан.

1. Введение. Грязевые вулканы широко распространены на земном шаре. По некоторым оценкам их более 700. Наибольшее количество грязевых вулканов наблюдается в Азербайджане (более 300). Второй по количеству таких вулканов в СНГ является Керченско-Таманская область. Грязевой вулканизм — сложное, малоизученное геологическое образование. В настоящее время установлена связь грязевого вулканизма с наличием залежей углеводородов и динамикой глубинных флюидов, однако до сих пор достоверно не известен механизм образования таких вулканов. Одним из интересных и активных вулканов в Таманской грязевулканической провинции является грязевой вулкан “Гора Карабетова” [1, 2].

Институт вычислительной математики и математической геофизики (ИВМиМГ) СО РАН совместно с Институтом физики Земли РАН и Кубанским государственным университетом, начиная с 2005 г., выполнил ряд экспериментальных исследований по вибросейсмическому зондированию этих уникальных природных явлений. В частности, были поставлены эксперименты на грязевых вулканах Тамани — “Шуго”, “Ахтанизовский”, “Гора Карабетова” [3–6]. Наиболее детальные наблюдения были проведены на последнем вулкане, некоторые результаты этих экспериментов будут приведены в настоящей статье. Впервые также представлена математическая модель грязевого вулкана “Гора Карабетова”, приводятся результаты численного моделирования и сравнения натурального и численного экспериментов.

2. Математическое моделирование грязевого вулкана “Гора Карабетова”. В настоящее время имеется широкий спектр численных методов, применяемых для моделирования полных волновых полей в неоднородных упругих средах. Из всех известных методов численного моделирования распространения упругих волн наиболее гибкими, в случае сложно построенных трехмерно неоднородных упругих сред, являются разностный метод и метод конечных элементов, однако их использование требует больших вычислительных затрат даже при применении кластерных суперЭВМ.

Разработанная параллельная программа, представленная в данной работе, предназначена для численного моделирования распространения упругих волн в трехмерно неоднородных моделях упругих сред с использованием конечно-разностного метода.

2.1. 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.

Эта постановка задачи представлена в терминах вектора скоростей смещений $\mathbf{u} = (U, V, W)^T$ и тен-

¹ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, просп. Лаврентьева, 6, 630090, Новосибирск; Б. М. Глинский, зав. лабораторией, e-mail: gbm@opg.sgcc.ru; Д. А. Караваев, аспирант, e-mail: dmitry1985@ngs.ru; В. В. Ковалевский, зам. директора, e-mail: kovalevsky@sgcc.ru; В. Н. Мартынов, ст. науч. сотр., e-mail: vnm@nmsf.sgcc.ru

зона напряжений $\sigma = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz})^T$:
$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = A\sigma + \mathbf{F}(t, x, y, z), \\ \frac{\partial \sigma}{\partial t} = B\mathbf{u}, \end{cases}$$

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

Начальными условиями являются $U(x, y, z, t)|_{t=0} = 0$, $V(x, y, z, t)|_{t=0} = 0$, $W(x, y, z, t)|_{t=0} = 0$, а граничными — $\sigma_{xz}|_{z=0} = 0$, $\sigma_{yz}|_{z=0} = 0$, $\sigma_{zz}|_{z=0} = 0$. В данной постановке $\lambda(x, y, z)$ и $\mu(x, y, z)$ являются параметрами Ламе. Предполагается, что плотность ρ зависит от трех пространственных переменных и правая часть (массовая сила) может быть представлена в виде: $\mathbf{F}(t, x, y, z) = F_x \mathbf{i} + F_y \mathbf{j} + F_z \mathbf{k}$. Например, для источника типа “вертикальная сила” получим представление: $\mathbf{F}(t, x, y, z) = \delta(x - x_0)\delta(y - y_0)\delta(z - z_0)f(t)\mathbf{k}$, где (x_0, y_0, z_0) — координаты источника.

2.2. Метод решения задачи. Метод решения поставленной задачи основан на использовании конечно-разностного метода. Алгоритм построения конечно-разностной схемы предложен в статье [7]. Аналогичный подход для статических задач теории упругости был также развит [8]. Расчет сеточных коэффициентов в разностной схеме проводится на основе интегральных законов сохранения (поскольку параметры λ , μ и ρ могут быть разрывными).

Конечно-разностная схема имеет второй порядок аппроксимации по времени и пространству [7]. Общий вид некоторых уравнений уравнений конечно-разностной схемы следующий:

$$\begin{aligned} \frac{\rho_{i,j,k} + \rho_{i-1,j,k}}{2} \frac{u_{i-1/2,j,k}^{n+1} - u_{i-1/2,j,k}^n}{\tau} &= \frac{\sigma_{xxi,j,k}^{n+1/2} - \sigma_{xxi-1,j,k}^{n+1/2}}{\Delta x} + \frac{\sigma_{xyi-1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - \sigma_{xyi-1/2,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta y} + \\ &+ \frac{\sigma_{xzi-1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - \sigma_{xzi-1/2,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} + f_{xi,j,k}^n, \\ \frac{\sigma_{xxi,j,k}^{n+1/2} - \sigma_{xxi,j,k}^{n-1/2}}{\tau} &= (\lambda + 2\mu)_{i,j,k} \frac{u_{i+1/2,j,k}^n - u_{i-1/2,j,k}^n}{\Delta x} + \lambda_{i,j,k} \frac{v_{i,j+1/2,k}^n - v_{i,j-1/2,k}^n}{\Delta y} + \\ &+ \lambda_{i,j,k} \frac{w_{i,j,k+1/2}^n - w_{i,j,k-1/2}^n}{\Delta z}, \\ \frac{\sigma_{xyi-1/2,j-1/2,k}^{n+1/2} - \sigma_{xyi-1/2,j-1/2,k}^{n-1/2}}{\tau} &= \mu'_{i-1/2,j-1/2,k} \left(\frac{u_{i-1/2,j,k}^n - u_{i-1/2,j-1,k}^n}{\Delta y} + \frac{v_{i,j-1/2,k}^n - v_{i-1,j-1/2,k}^n}{\Delta x} \right). \end{aligned}$$

Пример расчета взвешенного коэффициента μ' для расчета σ_{xy} :

$$\mu'_{i-1/2,j-1/2,k} = \left(\frac{1}{4} \left(\frac{1}{\mu_{i,j,k}} + \frac{1}{\mu_{i-1,j,k}} + \frac{1}{\mu_{i,j-1,k}} + \frac{1}{\mu_{i-1,j-1,k}} \right) \right)^{-1}.$$

Критерий устойчивости данной схемы [7]: $\tau \leq \left(V p_{\max} \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}} \right)^{-1}$. Здесь Δx , Δy и Δz — шаги дискретизации по пространственным переменным, τ — шаг дискретизации по времени; $V p_{\max}$ — максимальная скорость распространения упругих волн.

Общая схема вычислений выглядит следующим образом. Вначале на первом полушаге по времени определяются компоненты вектора скорости смещения, затем на втором полушаге по времени по форму-

лам находятся нужные компоненты напряжений. Далее вычисляются новые компоненты образов вектора скорости смещения на новом полушаге по времени.

2.3. Реализация “построителя” трехмерной модели упругой среды. Для проведения численного расчета по представленной методике необходимо иметь трехмерную сеточную модель исследуемой среды. В настоящее время существуют программные средства, позволяющие задавать сеточные 3D-модели упругих сред, однако они в своем большинстве находятся в составе больших систем (например, AutoCAD). В некоторых случаях их использование невозможно по причине их отсутствия или неприспособленности к заданию специфических геометрических структур исследуемых объектов с произвольными параметрами: плотность и модули упругой среды. Поэтому для выполнения данной работы был создан специализированный построитель трехмерных моделей неоднородных упругих сред. Этот инструментальный применяется для построений различных моделей упругих сред, в том числе сред, характерных для грязевых вулканов. С помощью разработанного построителя задаются значения λ , μ и 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 (V_p , V_s и 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.

3. Параллельная реализация и исследование времени работы программы. Для численного моделирования распространения упругих волн в трехмерно-неоднородных упругих средах на основе приведенной выше разностной схемы выполнение полномасштабных вычислительных экспериментов требует значительных вычислительных ресурсов.

Поэтому в данном случае необходимо было провести распараллеливание с целью ускорения вычислений и возможности расчета реальных моделей упругих сред. В настоящее время в ИВМиМГ СО РАН имеются различные многоядерные вычислительные комплексы, такие как вычислительные серверы с общей памятью и вычислительные кластеры, на одном вычислительном узле которых находится несколько многоядерных процессоров. Отметим кластер на базе процессора Intel Xeon E5450, 3.0 ГГц и кластер на базе процессора Itanium 2, 1.6 ГГц. Все они могут использоваться для решения больших геофизических задач, связанных с численным моделированием.

Одно из основных требований к параллельной программной реализации состояло в том, чтобы программа могла эффективно работать на однородных кластерах с различным количеством и типами процессоров, расположенных на узле.

Необходимо отметить, что выбор способа декомпозиции расчетной области во многом обусловлен “шаблоном” вычислительной схемы. В данной работе для решения мы используем явную конечно-разностную схему, где для расчета конкретного узла необходима информация только о соседних узлах конечно-разностной схемы.

Известно несколько подходов для распараллеливания (декомпозиции области) 3D разностных схем. Для распараллеливания данной задачи нами были рассмотрены два из них. Первый состоит в разбиении исходной вычислительной модели на “кубики”. Второй основан на декомпозиции области на слои вдоль направления одной из координатных осей (в нашем случае выбрано разбиение вдоль оси Z). При реализации этих схем 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 искомых величинах между “соседями”. В первом случае, возможно, есть большая универсальность и некоторая гибкость метода, но в то же время его сложно реализовывать программно и необходимо производить обмены по каждой из граней между соседними “кубиками”. Во втором случае резко сокращается количество обменов, поскольку их необходимо производить только между соседними слоями, но объем передаваемой каждый раз информации больше, нежели в первом случае.

Основной причиной, по которой был выбран второй способ, является простота реализации и сравнительно небольшое количество обменов.

На основе выбранной схемы были созданы две параллельные программы: одна, в которой для распа-

раллеливания используется только MPI, и вторая, в которой используется комбинация возможностей MPI и OpenMP. 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 на основе OpenMP. Количество слоев для “гибридной” схемы определяется количеством свободных вычислительных узлов, а количество OpenMP-потоков — количеством ядер на узлах, тогда как для MPI-программы — общим количеством ядер на выделенных вычислительных узлах. Число слоев зависело также и от требований к оперативной памяти для проведения необходимых расчетов. На каждом временном шаге моделирования необходимо было произвести две серии обменов информацией о волновом поле: одна — для поля скоростей смещений, вторая — для компонент тензора напряжений. Весь обмен информацией реализован через интерфейс MPI с помощью блокирующих операций получения и передачи данных.

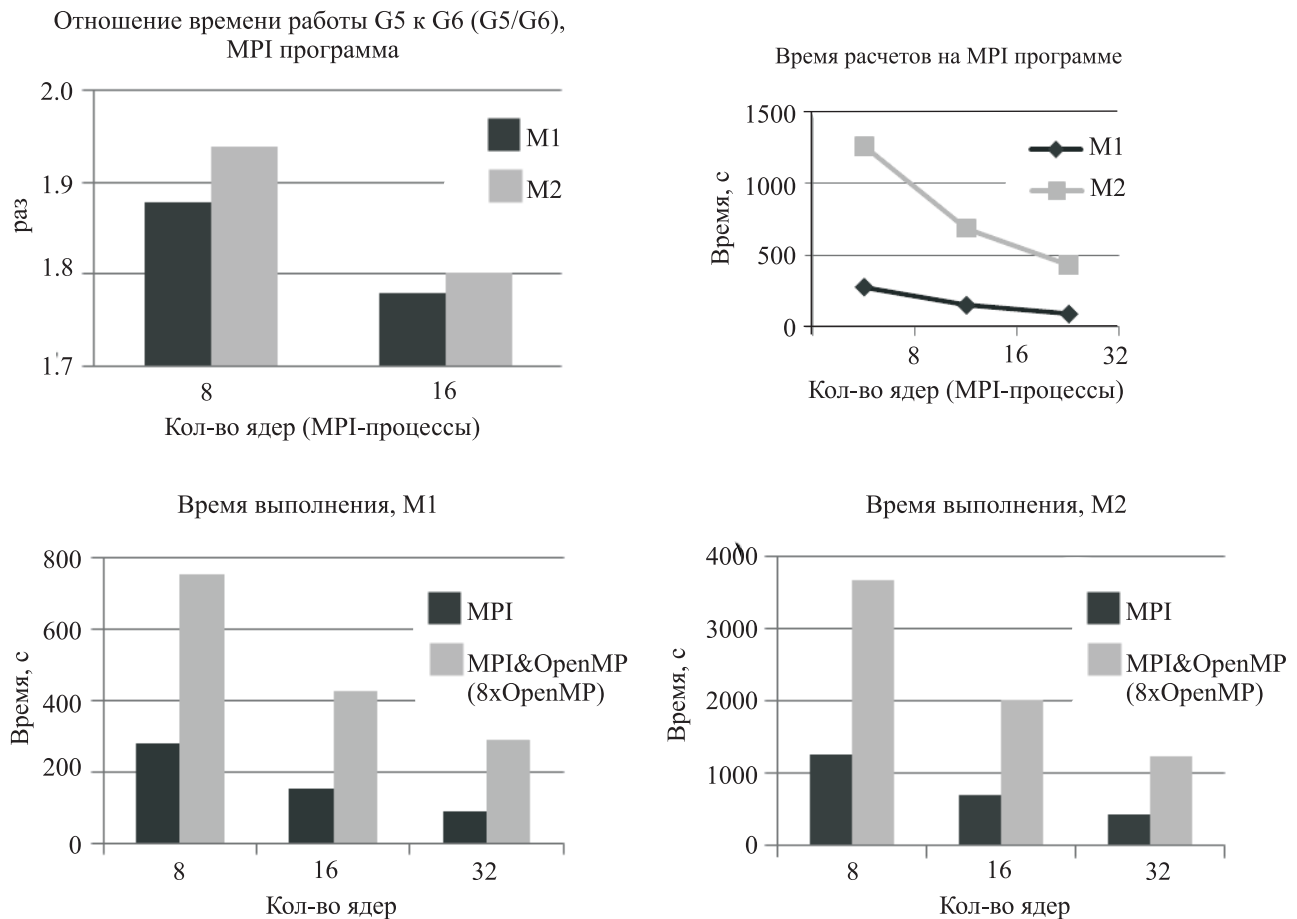


Рис. 1. Результаты сравнения времени работы программ

Зависимость времени, затраченного на моделирование, от количества используемых ядер исследовалось на небольших задачах, поэтому проведенные тестовые расчеты являются своего рода “ориентиром”. С целью сравнения времени расчета (рис. 1 и 2) были выбраны две тестовые трехмерные модели среды — M1 и M2. Параметры расчетной области (количество узлов в разностной сетке по координатам X , Y и Z) для каждой модели приведены в табл. 1. Проведено также сравнение времени работы программы на различных типах вычислительных серверов hp BL2x220c G5 и hp BL2x220c G6 для представленных моделей M1 и M2 (рис. 1). Расчеты также проводились на кластере НКС-30Т (ССКЦ ИВМиМГ СО РАН). Для компиляции программы на кластере использовался штатный компилятор Intel(R) Fortran.

Первые результаты численных экспериментов для различных расчетных моделей упругих сред показали, что реализация второго подхода (комбинация возможностей MPI и OpenMP) при использовании штатных компиляторов оказалась неэффективной: при использовании 32 ядер (4 узла) — в среднем в 2.8 раза медленнее. Полученные результаты не вызывают удивления, поскольку при организации параллельных вычислений средствами OpenMP на отдельном узле следует уметь прогнозировать распределение памяти при расчете, так как потоки при обращении к памяти могут использовать данные из памяти

Таблица 1

Параметры тестовых 3D-моделей

Описание 3D-моделей для расчетов		Модель	
		M1	M2
Размеры расчетной области (кол-во узлов)	X	201	301
	Y	161	241
	Z	221	331
Количество шагов по времени	Time	650	975

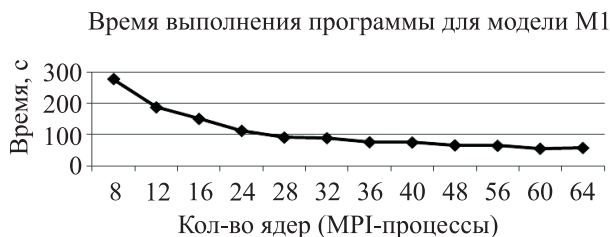


Рис. 2. Зависимость времени работы MPI-программы от количества ядер на кластере НКС-30Т

соседнего процессора. Очевидно, что в этом случае требуется индивидуальная настройка программы на свойства процессоров, расположенных на узле. Поскольку MPI-программы обладают некоторой универсальностью и переносимы на кластеры с любой архитектурой, то основные усилия по оптимизации программы были направлены на реализацию алгоритма с помощью библиотеки MPI.

Представленные результаты могут служить некоторой оценкой для определения времени работы параллельной программы уже на больших вычислительных задачах, требующих большего количества ресурсов.

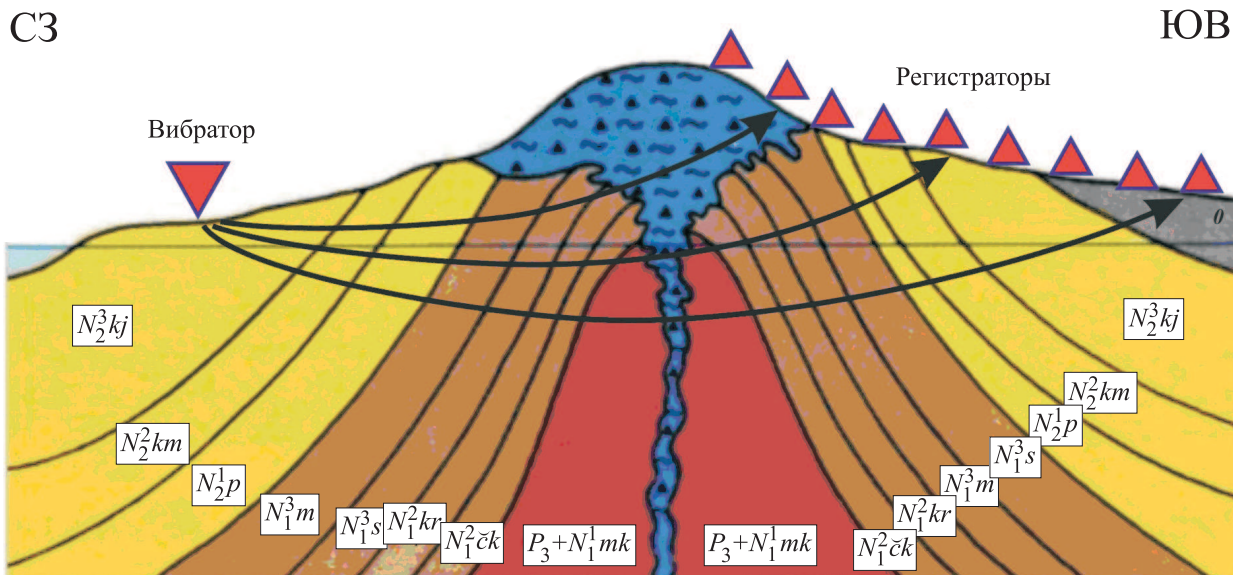


Рис. 3. Геологический разрез и схема вибросейсмического зондирования грязевого вулкана "Гора Карabetова"

4. Экспериментальные исследования грязевого вулкана "Гора Карabetова" вибросейсмическими методами. В данном разделе кратко описывается эксперимент, проведенный на грязевом вулкане с применением вибросейсмического источника и сейсмических регистраторов RefTek и РОСА. Анализируется спектральный состав волнового поля и динамика его поведения для профиля, пересекающего вулкан.

В экспериментальных работах по активному вибросейсмическому просвечиванию грязевого вулкана "Гора Карabetова" использовался сейсмический вибрационный источник СВ-10/180 и регистрирующие комплексы RefTek-125А (40 регистраторов с вертикальными сейсмоприемниками GeoSpace GS-20DX) и РОСА (18 каналов с трехкомпонентными датчиками GeoSpace и СМЕ-3011). Общая схема зондирования вулкана приведена на рис. 3.

Для определения строения и скоростных характеристик вмещающей среды была проведена регистрация волнового поля вибраторов на профиле вне зоны вулкана. Излучение сигналов вибраторами осуществлялось в точках вдоль профиля с применением методики сейсморазведки на отраженных волнах и метода общей глубинной точки.

С этим же расположением точек излучения сигналов вибратором был отработан поперечный профиль регистрации длиной 3.2 км, пересекающий вулкан. Поперечный профиль через вулкан отработывался в два приема, с использованием 37 и 31 регистраторов RefTek. Именно этот поперечный профиль с точками излучения на концах профиля будет анализироваться в данной работе.

В качестве зондирующих сигналов вибратора использовались свип-сигналы (сигнал с линейной раз-верткой частоты в данном диапазоне с длительностью 60 с) в диапазоне частот 10–64 Гц. Количество зондирований в одной точке составляло 5, 10 и 20 для различных точек. Это позволило поднять по-мехоустойчивость вибрационных сейсмограмм (получаемых путем корреляционной свертки излучаемого и принятого сигналов) в условиях регистрации при повышенных сейсмических шумах. Регистрация из-лучаемого сигнала велась в режиме непрерывного времени с записью файлов волновых форм длиной 3300 с. Синхронизация по времени регистрирующих систем и вибратора осуществлялась при помощи GPS-приемников. Одним из сейсмоприемников RefTek осуществлялась регистрация сигнала от генера-тора сигналов вибратора СВ-10/100. Запись формы излучаемого вибратором сигнала велась с целью использования последнего в качестве опорного при вычислении вибрационных сейсмограмм в режиме зондирования широкополосными сигналами, что позволило избежать ошибок временной синхронизации. Второй регистратор RefTek использовался для записи колебаний грунта в непосредственной близости от вибратора.

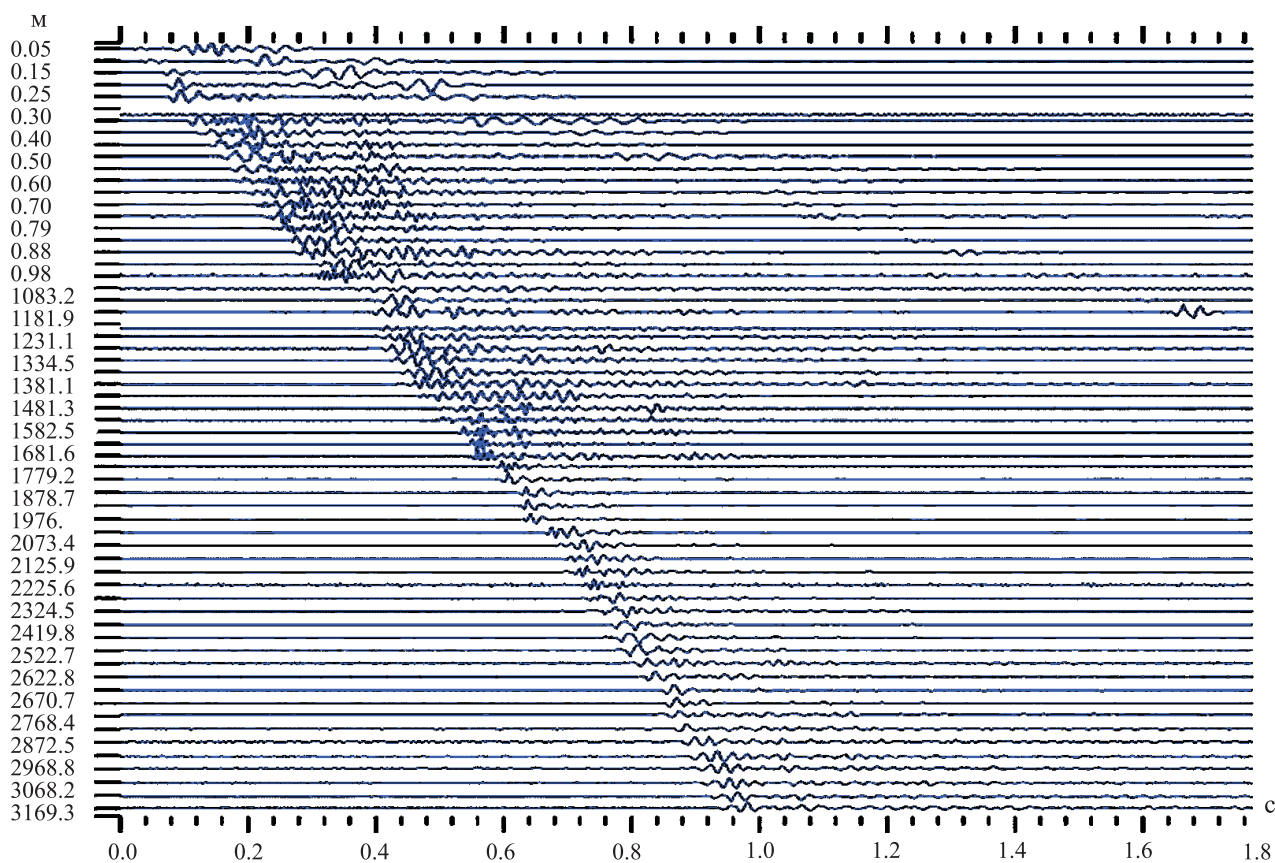


Рис. 4. Пример вибрационных сейсмограмм, полученных на профиле, пересекающем вулкан.

По вертикали — расстояние регистратора от источника в метрах,
по горизонтали — время регистрации в секундах

Полученный полевой материал обрабатывался с помощью специальных программ. Были получены корреляционные сейсмограммы (пример приведен на рис. 4) и проекции спектрально-временных функций (СВФ), примеры приведены на рис. 5 и 6.

Временная структура волнового поля характеризуется усложнением по мере приближения к телу вулкана. Одиночные волновые формы на начальном участке зондирования разрастаются до нескольких пиков волн в районе вулкана и далее за ним. Соответственно их длительность при этом возрастает примерно на порядок. Усложнение структуры волнового поля во временной области сопровождается изменениями в спектральной области.

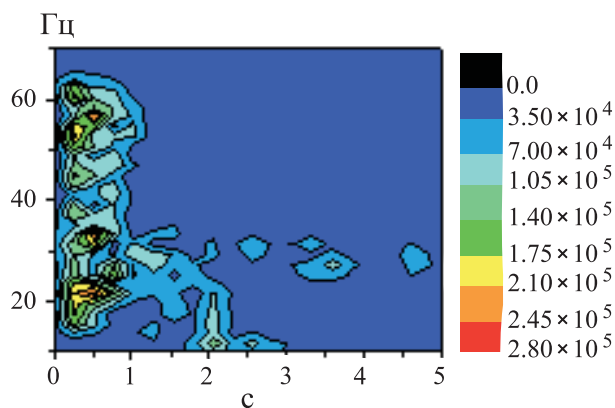


Рис. 5. Проекция СВФ на удалении 740 м от источника (район скопления грифонов)

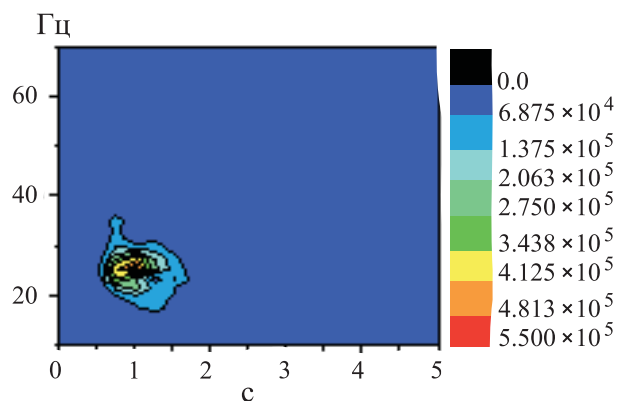


Рис. 6. Проекция СВФ на удалении 1480 м от источника (центр вулкана)

Спектральный анализ вибрационных сейсмограмм (коррелограмм) на этом профиле показывает довольно сложную картину прохождения сейсмических волн через тело вулкана.

На расстояниях до 1800 м от источника отчетливо просматривается поверхностная волна со скоростью около 340 м/с, имеющая спектральные пики на частотах 12–15 Гц.

По мере приближения к центру вулкана спектральная картина начинает меняться. Появляются более высокие частоты, спектр существенно расширяется (рис. 5), на некоторых расстояниях появляются узкополосные пики, связанные, возможно, 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 появляется узкополосный спектральный пик на частоте 25–28 Гц (рис. 6), 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 по предложенной вычислительной схеме, ориентированное на изучение геометрических параметров вулкана “Гора Карabetова”, результаты которого приведены в следующем разделе.

На рис. 5 и 6 по горизонтали обозначено время в секундах, по вертикали — частота в герцах, цветовая шкала отображает амплитуду спектра в относительных единицах.

5. Результаты численного эксперимента на модели “Гора Карabetова”. Результаты полевых экспериментов показали, что структура грязевых вулканов имеет сложную геометрию и неоднородное строение среды, в которой содержится жидкость, пузыри газа, неоднородные включения и т.д. Соответственно все это оказывает влияние на структуру волнового поля, наблюдаемого в экспериментах.

В пределах Карabetовской антиклинальной зоны размещены грязевые вулканы “Гора Карabetова”, “Гора Чиркова”, “Северо-Нефтяной” и “Дубовый Рынок”. В строении антиклинали принимали участие отложения майкопской серии, чокракского, караганского, сарматского, мэотического, понтического, киммерийского и куяльницкого ярусов. Майкопская толща составляет три и более километров [1].

Строение характерно для большинства диапировых антиклиналей Таманского полуострова. Ядро складок прорвано сильно перемятыми пластичными глинами Майкопского периода. Более молодые слои вблизи ядра залегают обычно круто, по мере удаления от оси складок они выполаживаются, а мощность их увеличивается. Однако в своде собственно Карabetовской складки приповерхностная часть ядра не прорвана майкопскими глинами. Глубина залегания майкопского диапирового ядра около 1 км, северо-северо-восточное простирание антиклинали.

Предполагается, что майкопская серия является решающей в формировании геологических структур, ответственных за возникновение грязевых вулканов [2]. По результатам микросейсмического зондирования (там же) под вулканом выделена относительно узкая вертикальная низкоскоростная зона, ассоциируемая с насыщенным флюидами подводящим каналом. Область питания для подводящего канала по данным эксперимента находится на глубине 4.5–9 км и, возможно, продолжается до глубины более 15 км. Следует отметить, что кристаллический фундамент находится также на глубине 15 км.

В данной работе мы проводим численное моделирование, цель которого представить влияние геометрии модели на структуру волнового поля, т.е. не учитываются особенности, связанные с учетом присутствия разнородного строения среды с включением различных неоднородностей, хотя программа позволяет проводить расчеты такого вида. В этой связи, на первом этапе мы рассматриваем простые модели,

которые позволяют исследовать основные особенности волнового поля. Для исследования структуры волнового поля, получаемой при проведении полевых экспериментов на грязевом вулкане “Гора Карabetова”, были проведены тестовые расчеты для различных моделей сред, одна из которых представлена далее.

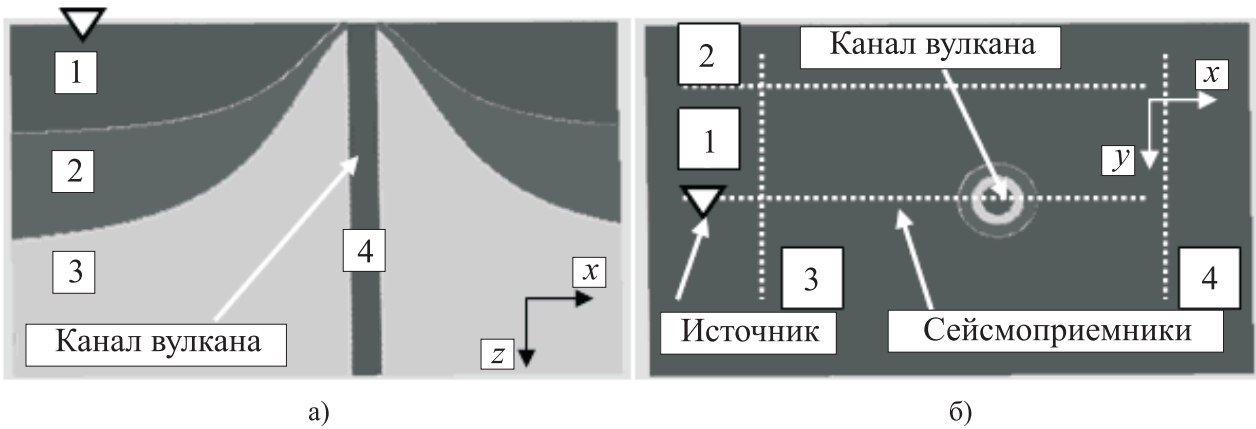


Рис. 7. Геометрическая структура 3D-модели упругой среды в различных плоскостях сечений

Моделируется трехслойная среда с цилиндрическим включением (рис. 7а) с параметрами:

слой 1: $Vp = 2.0$ км/с, $Vs = 1.0$ км/с, $\rho = 2.55$ г/см³;

слой 2: $Vp = 2.7$ км/с, $Vs = 1.35$ км/с, $\rho = 2.75$ г/см³;

слой 3: $Vp = 2.5$ км/с, $Vs = 1.25$ км/с, $\rho = 2.55$ г/см³;

слой 4 (цилиндр): $Vp = 1.7$ км/с, $Vs = 0.85$ км/с, $\rho = 0.75$ г/см³.

Здесь Vp и Vs — скорости распространения продольных и поперечных волн соответственно, ρ — плотность упругой среды.

Источник — “центр давления”, несущая частота 25 Гц — расположен вблизи свободной поверхности (белый треугольник, рис. 7а).

Система наблюдения — четыре линии сейсмоприемников на свободной поверхности (рис. 7б).

Численное моделирование для 3D-модели (рис. 7) проведено на вычислительных блэйд-серверах hp ProLiant BL2x220c G5, находящихся в составе НКС-30Т (ССКЦ ИВМиМГ СО РАН). Некоторые параметры расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры расчета

Кол-во узлов расчетной сетки	по оси X	1677
	по оси Y	1059
	по оси Z	971
	по времени	10313
Кол-во используемых ядер (MPI-процессов)		160
Время, затраченное на моделирование		31 ч 15 м 17 с (112517 сек)

Результаты моделирования в виде теоретических сейсмограмм и мгновенных снимков волнового поля представлены на рис. 8 и 9.

Проведенные расчеты показывают, что при прохождении сейсмической волны через область трубки на профиле 1 (рис. 9), пересекающем ее, отчетливо видна вертикальная полоса, соответствующая дилатантной зоне грязевого вулкана. Медленное затухание поля, показанное на рис. 8 (t_4), связано с резонансными проявлениями, обусловленными геометрией изучаемого объекта, что полностью согласуется с экспериментальными данными.

Заключение. Анализ СВФ по профилю, пересекающему зону вулкана “Гора Карabetова”, и численное моделирование, основанное на геометрических особенностях этого вулкана, показали следующее:

— в спектрах вибрационных сейсмограмм на фоне их широкополосной части появляются узкополосные составляющие, характеризующие селективные свойства среды с выраженной неоднородностью;

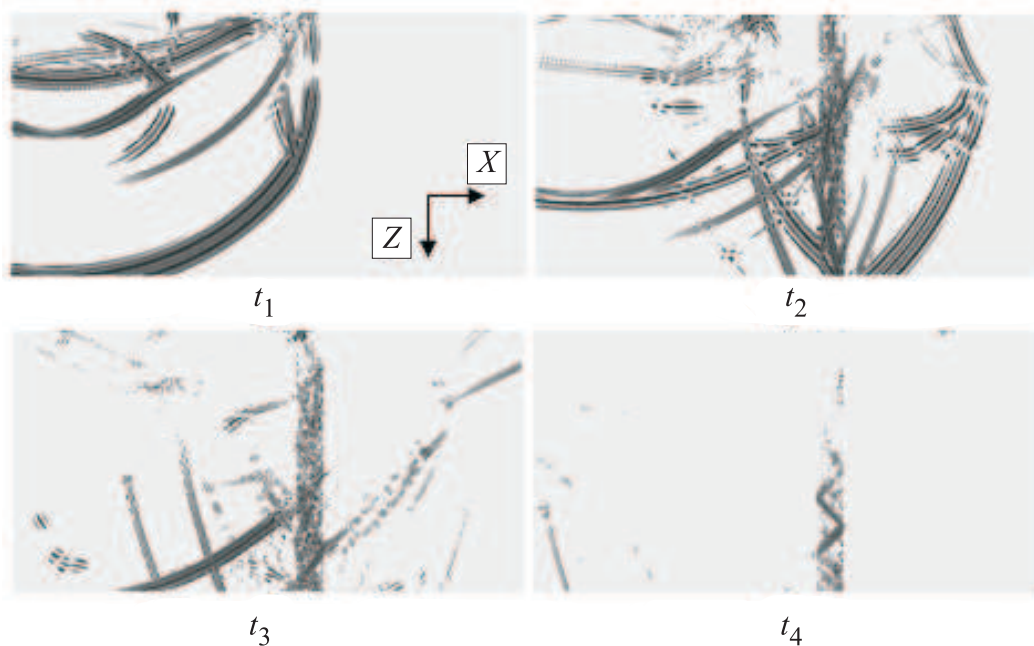


Рис. 8. Снимки W -компоненты волнового поля в различные промежутки времени для профиля 1

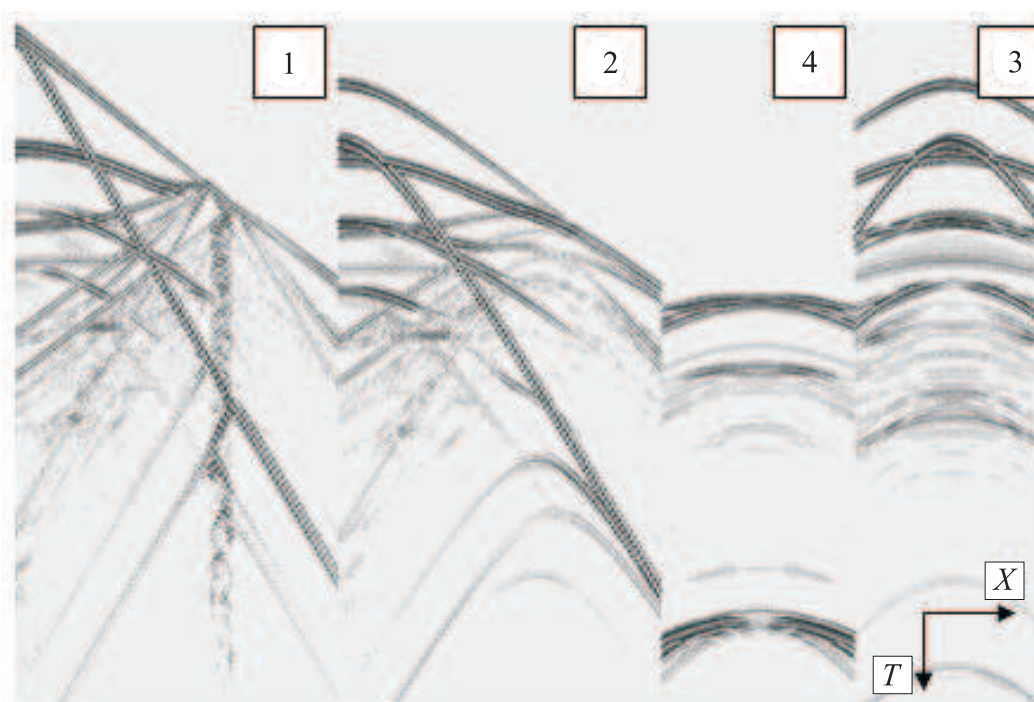


Рис. 9. Теоретические сейсмограммы, W -компонента волнового поля для профилей 1–4

вероятно, это связано с мелкими подводящими 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 также подтверждают, что этот пик может быть связан с геометрией центрального канала вулкана;

— спектры сейсмограмм непосредственно в области вулкана характеризуются двумя особенностями: с одной стороны, смещением узкополосных пиков в область более высоких частот на компонентах Z , а с другой — расширением спектров колебаний в область высоких частот. Такие явления связаны с трансформацией спектра на трещиноватых и флюидонасыщенных структурах тела вулкана, обусловленной нелинейными процессами распространения волн в зонах разрушения горных пород.

Для моделирования структур, характерных для грязевых вулканов, создан специализированный построитель трехмерных моделей неоднородных упругих сред. Разработанный построитель модели позволяет конструировать сложные 3D-модели неоднородных упругих сред, близкие к реальным объектам исследования.

С применением этого построителя был проведен численный эксперимент для заданных параметров геофизической модели вулкана, расчет с помощью параллельной программы проведен на вычислительном кластере НКС-30Т. Описан способ распараллеливания вычислений для представленной задачи.

Приведены результаты тестовых расчетов, показывающие время работы на различном количестве используемых ядер для различных параллельных реализаций программы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грязевые вулканы Керченско-Таманского региона / Шнюков Е.Ф., Шереметьев В.М., Маслаков В.А. и др. Краснодар: ГлавМедиа, 2006.
2. Горбатилов А.В. и др. Технология глубинного зондирования земной коры с использованием естественного низкочастотного микросейсмического поля // Коллективная монография "Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ними техногенные катастрофы". Т. 1. Сейсмические процессы и катастрофы. М.: ИФЗ РАН, 2008. 221–236.
3. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Собисевич А.Л., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С. и др. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, Филиал "Гео" Изд-ва СО РАН, 2004.
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. 413, № 3. 398–402.
5. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Имомназаров Х.Х., Ковалевский В.В., Собисевич Л.Е., Хайретдинов М.С., Цибульчик Г.М. Мониторинг геометрии и физических свойств "поверхностной" и "очаговой" дилатантных зон методом вибросейсмического просвечивания сейсмоопасных участков земной коры // Коллективная монография "Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ними техногенные катастрофы". Т. 1. Сейсмические процессы и катастрофы. М.: ИФЗ РАН, 2008. 179–223.
6. Глинский Б.М., Собисевич А.Л., Фатъянов А.Г., Хайретдинов М.С. Математическое моделирование и экспериментальные исследования грязевого вулкана Шуго // Вулканология и сейсмология. 2008. № 4. 1–9.
7. Караваев Д.А. Параллельная реализация метода численного моделирования волновых полей в трехмерных моделях неоднородных сред // Информационные технологии. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2009. № 6 (1). 203–209.
8. Коновалов А.Н. Сопряженно-факторизованные модели в задачах математической физики // Сиб. журн. вычисл. математики. 1998. 1, № 1. 25–57.

Поступила в редакцию
11.03.2010
