

УДК 550.34.013

Численное моделирование распространения упругих волн в средах с подземными полостями на суперЭВМ*

А.А. ЯКИМЕНКО, Д.А. КАРАБАЕВ

Представлено разработанное программное обеспечение с использованием технологий параллельного программирования для численного моделирования распространения упругих волн в 3D и 2D неоднородных упругих средах, содержащих кавернозные включения. Программы разработаны в интересах решения задач инспекции на месте. Представлены результаты численных расчетов, дана интерпретация и выделены группы волн, отражающие влияние кавернозного включения на картину волнового поля. Расчеты проводились на многоядерном вычислительном комплексе Сибирского суперкомпьютерного центра НКС–30Т.

Ключевые слова: численное моделирование, сейсмические поля, суперЭВМ, параллельный алгоритм, кавернозные среды.

ВВЕДЕНИЕ

Создание вычислительной технологии на принципах распараллеливания для численного моделирования процессов распространения упругих волн в неоднородных 2D-, 3D-средах, имеющих различные включения, является актуальным для многих приложений. В данной работе это связано с проблемой обнаружения скрытых ядерных испытаний. Важным этапом в решении проблемы является инспекция на месте, направленная на локализацию подземных полостей (каверн), образуемых в результате проведения подземного ядерного взрыва [1]. На сегодня это является важной и трудной задачей. В [2] предложен вибросейсмический метод обнаружения кавернозных включений в неоднородных средах. Один из ключевых вопросов такой методики связан с выбором отличительных информативных параметров сейсмических полей, характеризующих смежные области. Ответ на этот вопрос может быть получен на основе численного моделирования процессов распространения сейсмических колебаний через обозначенные среды. Решение этой задачи позволяет определить выбор оптимальных параметров будущей технологии зондирования и регистрации волн – задание характеристик вибрационного источника, геометрии расстановки приемо-регистрирующей системы, ориентацию на регистрируемые типы сейсмических волн.

Очевидно, что полнота складывающейся картины поля будет зависеть от выбора модели рассматриваемой среды, от диапазона частот зондирующих вибросейсмических колебаний и некоторых других факторов, нуждающихся в исследовании.

Численное моделирование распространения сейсмических волн в сложно построенных упругих неоднородных средах проведено на основе решения полной системы уравнений теории упругости с соответствующими начальными и граничными условиями [3].

Известен широкий спектр численных методов, применяемых для моделирования полных волновых полей в неоднородных упругих средах [6]. Наиболее гибкими для случая сложно построенных трехмерных неоднородных упругих сред являются разностный метод и метод конечных элементов. Применение таких методов численного моделирования требует больших

*Статья получена 23 ноября 2012 г.

вычислительных затрат даже в случае применения кластерных суперЭВМ [7]. Поэтому существует необходимость в распараллеливании вычислений, а также в проведении расчетов для «больших» моделей упругих сред с применением мелкой расчетной сетки с целью выявления тонких неоднородностей среды.

1. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ

С использованием конечно-разностного метода разработана параллельная программа для численного моделирования распространения упругих волн в трехмерно неоднородной упругой среде. Основные функциональные особенности программы связаны с возможностями задания моделей трехмерной модели упругой среды с включением различных неоднородностей, характеризующихся различными упругими параметрами; реализацией части, непосредственно отвечающей за проведение численного моделирования по конечно-разностной схеме. Разработан построитель, с помощью которого можно создавать довольно сложные модели, близкие к реальным объектам исследования. Для устранения отражений упругих волн от границ расчетной области реализованы поглощающие границы. Общий алгоритм построения конечно-разностной схемы для 3D-задач численного моделирования, а также описание построителя упругих моделей и параллельная реализация более подробно представлены в [3, 5]. Алгоритм адаптирован к модели распространения упругих волн от сосредоточенного источника вертикальной силы (вибрационного источника) в средах, которые могут содержать включения кавернозного типа, образованные в результате проведения подземных ядерных взрывов на испытательных полигонах. В статье рассмотрен случай двумерной модели упругих сред, но задача может быть обобщена и на трехмерный случай.

Для реализации нескольких вариантов распараллеливания были использованы технологии MPI и OpenMP. Первый вариант заключается в том, что исходная область расчетов делится по координатам X и Z на подобласти в количестве равном количеству вычислительных узлов, имеющемуся в распоряжении пользователя. Но в такой ситуации резко возрастает число обменов информацией между гранями соседних подобластей.

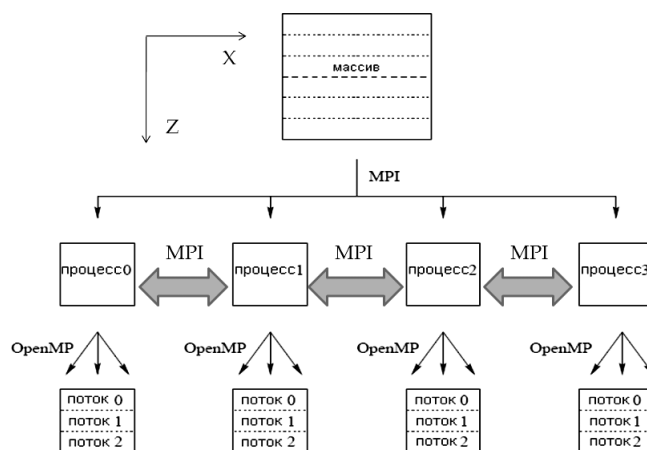


Рис. 1. Используемая структурная схема параллельных вычислений

В случае разбиения расчетной области на слои вдоль пространственной координаты Z число возможных слоев определяется количеством вычислительных узлов (ядер), выделяемым для проведения расчета. Нужно отметить, что при такой организации вычислений значительно уменьшается количество обменов информацией между узлами и используется обмен по общей горизонтальной границе двух соседних слоев. Весь обмен информацией реализован через MPI. OpenMP применяется для распараллеливания задачи в пределах отдельно взятого слоя (рис. 1).

Таким образом, количество обменов зависит от количества расчетных «слоев». Отметим, что на каждом шаге по времени необходимо проводить две серии обменов. Одна – для расчета поля скоростей смещений, другая – для расчета тензора напряжений.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.

Для исследования структуры волнового поля, образующегося в результате зондирования среды, проведены тестовые расчеты для различных моделей кавернозной зоны. При этом изучалось влияние геометрии модели на структуру волнового поля неоднородной среды, содержащей каверну, с целью выделения отличительных свойств поля, обусловленных ее присутствием. Для создания физико-геологической модели подземного ядерного взрыва использовались материалы работы [8]. Все численные расчеты проведены с использованием разработанной параллельной программы на кластере НКС–30Т ССКЦ СО РАН (ИВМиМГ СО РАН). В связи со спецификой рассматриваемой задачи проверка достоверности полученных результатов натурными экспериментами в ближайшее время невозможна. Данная вычислительная технология применялась в исследовании грязевых вулканов [3] и было показано хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных.

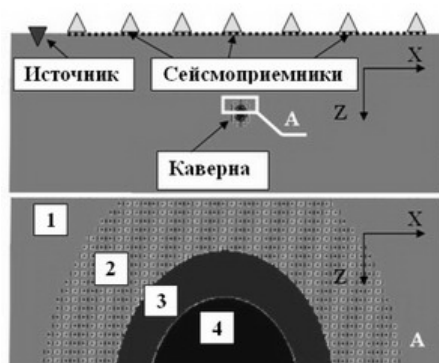


Рис. 2. Схема 2D-модели упругой среды в плоскости xOz , (верхняя часть рисунка) и детализация области A с каверной (нижняя часть рисунка). Цифра – номер элемента модели

На рис. 2 показана исследованная 2D-модель неоднородной упругой среды с линейными размерами 3.4 км по оси Ox и 1.0 км по оси Oz , содержащая одну подобласть, являющуюся каверной (4). Каверна окружена двумя внешними кольцами: одно из них полностью однородно (3), второе (2), имитирующее зону трещиноватости, заполнено равномерно распределенными включениями. Размеры этих включений, выраженные в единичных ячейках (со стороной $5.23 \cdot 10^{-4}$ км): вдоль оси Ox – одна ячейка, вдоль оси Oz – две ячейки. Упругие параметры элементов исследуемой модели представлены в работе [10], приведены в следующей таблице. Несущая частота в функции источника – 30 Гц.

Объект	V_p (км/с)	V_s (км/с)	ρ (г/см ³)	Радиус (км)
Вмещающая среда (1)	2.2	1.1	2.65	–
Кольцо (2), зона трещиноватости	5.0	3.0	2.8	0.089
Кольцо (3)	5.0	3.0	2.8	0.054
Каверна (4)	0.0	0.0	0.0	0.037

На рис. 3 приведен пример синтетической сейсмограммы для компоненты U_z , вертикальной составляющей сейсмического поля.

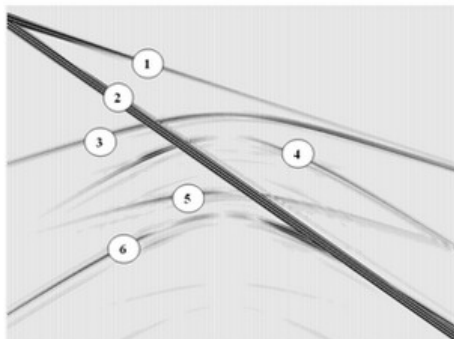


Рис. 3. Рассчитанная синтетическая сейсмограмма для компоненты U_z волнового поля. Горизонтальный линейный размер модели – 3.4 км

На синтетической сейсмограмме рис. 3 отчетливо видны несколько групп упругих волн, отмеченных цифрами 1–6 и описанные в [9]. Судя по времени прихода волн к сейсмоприемникам, выделенные группы соответствуют следующим типам волн: 1 – прямая P волна; 2 – поверхностная волна Рэля; 3 – P волна, отраженная от каверны; 4 – S волна, отраженная от каверны; 5 – SP волна, отраженная от каверны, 6 – SS волна, отраженная от каверны. Таким образом, группы волн, отмеченные цифрами 3–6, вызваны присутствием каверны. При этом волна (3) имеет значительную амплитуду и может являться предвестником присутствия каверны. Процесс образования отраженных волн, приведенных на синтетической сейсмограмме (рис. 3), иллюстрируют рассчитанные мгновенные снимки волнового поля для 12 различных временных промежутков (рис. 4).

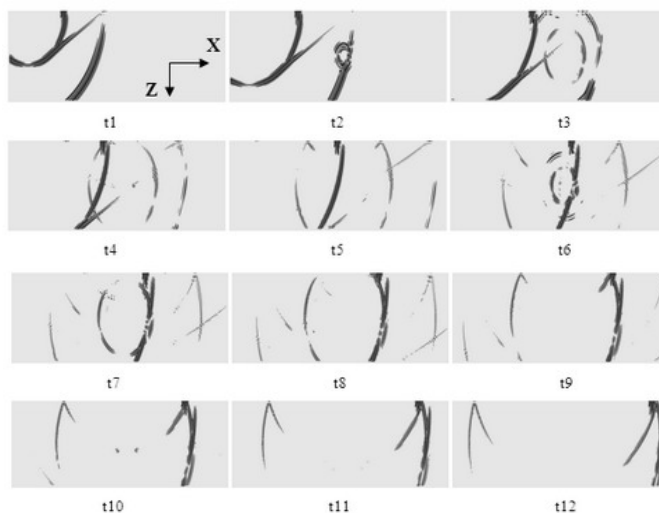


Рис. 4. Рассчитанные мгновенные снимки компоненты U_z волнового поля для 12 различных промежутков времени

Снимок на рис. 4 в момент t_3 отражает группы волн 3, 4; в моменты $t_6 - t_8$ – группы волн 5, 6. Поверхностная волна 2 отчетливо видна на всех мгновенных снимках волнового поля. Следует отметить, что при падении P и S волн от источника на каверну и при дальнейшем их

прохождении через каверну видна ответная реакция каверны, а именно: видны отраженные волны на свободной (дневной) поверхности. При дальнейшем расхождении волн и их распространении во вмещающей среде никаких резонансных эффектов, связанных с присутствием каверны, не наблюдается. По мгновенным снимкам не отмечено также значимых изменений поля при падении упругих волн, отраженных от свободной поверхности, при их падении на каверну. Таким образом, основные изменения сейсмического поля, вызванные присутствием каверны, связаны с прохождением через нее основных упругих волн.

Проведены аналогичные расчеты и для однородной среды, что позволило выполнить сравнение ее волнового поля с вышеприведенными результатами и построить разностные синтетические сейсмограммы. На рис. 5 приведена синтетическая сейсмограмма, которая отражает разницу между двумя сейсмограммами, рассчитанными: одна – для модели с каверной, другая – для модели однородной упругой среды.

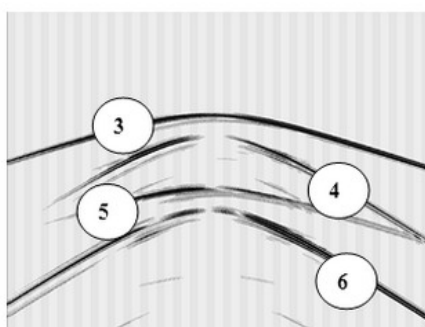


Рис. 5. Разностная синтетическая сейсмограмма для U_z компоненты волнового поля

Можно наблюдать эффект, вызванный присутствием в среде каверны, окруженной двумя внешними кольцами, включая зону трещиноватости, в виде волн P (3), S (4), SP (5), SS (6), отраженных от каверны. Данные группы волн отдельно выделены и представлены на рис. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана параллельная программа для проведения численного моделирования распространения упругих волн в 3D и 2D неоднородных упругих средах, содержащих кавернозные включения. С использованием многоядерного суперкомпьютера НКС–30Т, технологий параллельного программирования и выбора методов решения обеспечены сокращение времени вычислений и возможность расчета полей для «больших» моделей с повышенной детальностью.

Показано, что в волновом поле выделяются группы волн, связанные с кавернозным включением. Представлена интерпретация полученных синтетических результатов, отражающих влияние кавернозного включения на картину волнового поля. В дальнейшем предполагается провести серию вычислительных экспериментов для более сложных моделей сред, содержащих несколько каверн и перекрытых неоднородными слоями различной геометрии, что позволит приблизить численную модель к реальной ситуации, имеющей место на испытательных полигонах, и разработать методику обнаружения новых каверн на фоне уже существующих.

Вычислительные эксперименты для модели неоднородной упругой среды, содержащей каверну, позволяют изучать особенности сейсмических волновых полей в местах проведенных ядерных взрывов. Это позволяет обосновать выбор методики проведения экспериментальных работ в части определения наиболее подходящего места расположения системы наблюдения (сейсмоприемников) и ее геометрических параметров для обнаружения тех или иных аномальных эффектов.

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ №10-07-00387, №09-07-12075, Интеграционного проекта СО РАН №133, Программы Минобрнауки № 14.740.11.0350.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Арднт Р.** Проведение комплексного полевого эксперимента (ИПЭ08) ОДВЗЯИ – организации Договора о всеобщем запрещении ядерных испытаний, Вена, Австрия / Р. Арднт, М. Прах // Вестник НЯЦ РК. – 2012. – Вып. 1. – С. 79–87.
- [2] **Алексеев А.С.** Активная сейсмометрия с использованием вибрационных источников в проблеме инспекции на месте / А.С. Алексеев, Б.М. Глинский, М.С. Хайретдинов // Вестник НЯЦ РК. – 2006. – Вып. 2. – С. 142–149.
- [3] **Глинский Б.М.** Численное моделирование и экспериментальные исследования грязевого вулкана «Гора Карабетова» вибросейсмическими методами / Б.М. Глинский и др. // Вычислительные методы и программирование. – 2010. – Т. 11 – С. 95–104.
- [4] **Khairtdinov M.S.** Algorithms and methods for the numerical simulation of seismic wave fields in cavernous zones / M.S. Khairtdinov et al. // Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. Series: Mathematical Modeling in Geophysics. – 2010. – № 13 – Р. 71–78.
- [5] **Караваяев Д.А.** Параллельная реализация метода численного моделирования волновых полей в трехмерных моделях неоднородных сред / Д.А. Караваяев // Информационные технологии. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2009. – № 6 (1) – С. 203–209.
- [6] **Михайленко Б.Г.** Сейсмические поля в сложно построенных средах / Б.Г. Михайленко. – Новосибирск, 1988. – С. 312.
- [7] **Слепухин А.Ф.** Top500, ключевые моменты и основные достижения / А.Ф. Слепухин // СУПЕРКОМПЬЮТЕРЫ, 2011. - №4(8) – с.11 – 13.
- [8] **Каплан Ю.В.** Пассивная сейсмометрия при проведении инспекции на месте: этап поиска и этап локализации события / Ю.В. Каплан, Г.В. Шилина // Вестник НЯЦ РК. – 2004. – № 2 (18) – С. 112–117.
- [9] **Родин Г.** Сейсмология ядерных взрывов: пер. с англ. / Г. Родин. – М.: Мир, 1974. – С. 190.
- [10] **Знаменский В.В.** Полевая геофизика / В.В. Знаменский. – М.: Недра, 1980. – С. 351.

Якименко Александр Александрович, аспирант кафедры сетевых информационных технологий. Основное направление научных исследований: параллельное программирование. Имеет 11 публикаций. E-mail: al-le@yandex.ru

Караваяев Дмитрий Алексеевич, кандидат физико-математических наук. Основное направление научных исследований: математическое моделирование в геофизике, разработка параллельных программ. Имеет 20 публикаций. E-mail: kda@opg.sscc.ru

Yakimenko A.A., Karavaev D.A.*Numerical modeling of elastic wave propagation in media with subsurface cavities on supercomputers*

The description of developed software using parallel programming techniques for elastic wave propagation numerical modeling in 3D and 2D inhomogeneous elastic media containing cavernous inclusion is presented. The programs are used for tasks of on-site inspection. The numerical calculation results and the wave groups interpretation, reflecting the influence of the cavernous inclusion in wave field picture are presented. Calculations were carried out on the multi-core computer system of Siberian Supercomputer Center NKS-30T.

Key words: numerical modeling, seismic field, supercomputers, parallel algorithm, media with cavernous inclusion.