

УДК550.34:621.039.9

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ В ЗОНАХ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ

Хайретдинов М.С., Караваяев Д.А., Якименко А.А.

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

В интересах решения задач Инспекции на месте представлена технология численного моделирования волновых полей на гибридной супер-ЭВМ. В расчетах использованы известные модели кавернозных зон, применительно к которым получены волновые картины сейсмических полей и выполнен их анализ. Выделены информативные группы сейсмических волн, которые могут быть использованы в работах по обнаружению и распознаванию кавернозных зон, которые образуются в результате проведения подземных взрывов.

ВВЕДЕНИЕ

Создание вычислительной технологии на принципах распараллеливания для численного моделирования процессов распространения упругих волн в неоднородных 2D, 3D средах, имеющих включения в виде подземных полостей, является актуальной для многих приложений. В данной работе это связано с обеспечением контроля за непроведением ядерных испытаний и изучением последствий таких испытаний. Инспекция на месте является составной частью мер, предусмотренных Договором о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) [1] и содержит задачи, направленные на локализацию подземных полостей (каверн), образующихся в результате проведения подземного ядерного взрыва (ПЯВ). В [2] в качестве одного из подходов предложен вибросейсмический метод обнаружения кавернозных включений в неоднородных средах. При этом важным ключевым вопросом является поиск информативных типов волн, характеризующих наличие кавернозных включений на фоне примыкающих областей. Решение этой задачи позволяет определить выбор оптимальных параметров полевой технологии зондирования и регистрации волн - задание характеристик вибрационного источника, геометрии расстановки приемо-регистрирующей системы, ориентацию на регистрируемые типы сейсмических волн и др.

Предварительный этап поиска информативных типов волн связан с численным моделированием процессов распространения сейсмических колебаний через рассматриваемые среды. Наиболее гибкими для моделирования процессов распространения волн в сложно построенных 3-х мерных неоднородных упругих средах являются разностный метод и метод конечных элементов. Применение таких методов численного моделирования требует больших вычислительных затрат даже в случае применения кластерных суперЭВМ [3]. 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. Создание такой техноло-

гии на основе гибридной супер-ЭВМ и ее описание является одной из целей данной работы.

Очевидно, что полнота складывающейся картины волнового поля в результате численного моделирования зависит от выбора модели рассматриваемой среды, от выбора параметров зондирующих вибросейсмических колебаний, параметров расстановки регистрирующей системы датчиков. Изучение влияния перечисленных факторов также является целью исследований. Для модели кавернозной зоны без учета откольной зоны, представленной в [4], разработаны технология и результаты численного моделирования, представленные в [5]. Однако существует необходимость в привлечении более реалистичной модели зоны взрыва, включающей и откольную зону. В качестве такой модели выбрана ранее предложенная модель зоны разрушения среды в месте проведения подземного ядерного взрыва [6,7], детальные компоненты, которой будут рассмотрены ниже.

Конечная цель настоящей работы состоит в создании суперкомпьютерной технологии численного моделирования процессов вибрационного зондирования поствзрывной среды и выделение типов волн и их параметров, несущих информацию о кавернозных и откольных зонах.

ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

С использованием конечно-разностного метода разработана параллельная программа для численного моделирования распространения упругих волн в трехмерно неоднородной упругой среде. Реализация программного инструментария выполнена с применением гибридной вычислительной архитектуры в составе мультикластерной супер-ЭВМ НКС-30Т и высокопроизводительного GPU (graphics processing unit). Основные функциональные особенности программного инструментария связаны с: возможностями задания трехмерной модели упругой среды с включением неоднородностей с различными параметрами упругости, а также непосредственно программы численного моделирования по конечно-разностной схеме. Разработан строитель моделей, с помощью которого можно создавать сложные модели неоднородностей, близких к ре-

альным включениям. 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 построения упругих моделей и параллельная реализация более подробно освещены в [8, 9]. 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.

Для реализации нескольких вариантов распараллеливания были использованы технологии MPI (Message Passing Interface) и OpenMP (Open Multi-Processing). Первоначально исходная область расчетов делилась по координатам «X» и «Z» на подобласти в количестве, равном числу вычислительных узлов. При этом резко возрастает число обменов информацией между гранями соседних подобластей. В случае разбиения расчетной области на слои вдоль пространственной координаты «Z» (рисунок 1) число возможных слоев определяется количеством вычислительных узлов (ядер), выделяемых для проведения расчета.

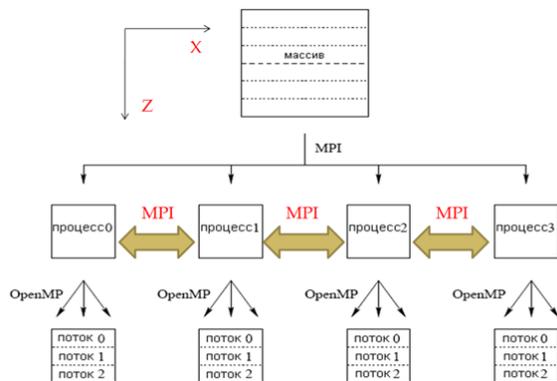


Рисунок 1. Используемая структурная схема параллельных вычислений

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 применялся для распараллеливания задачи в пределах отдельно взятого слоя. 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.

МОДЕЛЬ СРЕДЫ В РАЙОНЕ ПОДЗЕМНОГО ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА

По опубликованным материалам проведен аналитический обзор результатов изучения геофизического строения среды в местах проведения ПЯВ [4,6,7]. С целью выделения зон разрушений с помощью сейсмических наблюдений выполнены теоретические оценки размеров областей разрушения горных пород. Инженерно-геофизические исследования, проведенные в местах проведения ПЯВ [6,7] позволили выделить следующие зоны (рисунок 2): камуфлетная полость; зона смятия горных пород; зона дробления горных пород; зона интенсивной трещиноватости; зона блоковых подвижек; зона откольного разрушения; вмещающая среда.

На рисунке 3 приведена модель, построенная по изученным теоретическим данным, с геометрическими размерами 5 км по оси X и 1 км по оси Y, включающая следующие зоны: камуфлетная полость (1); зона смятия горных пород (2); зона дробления горных пород (3); зона интенсивной трещиноватости (4); зона откольного разрушения (5); вмещающая среда (6).

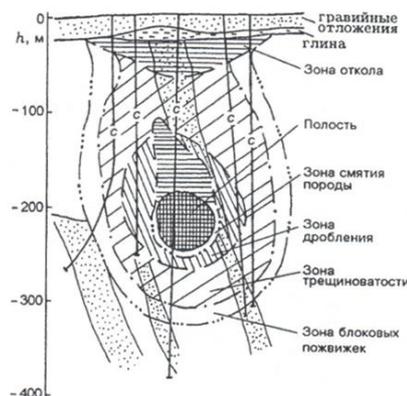


Рисунок 2. Зоны деформации в месте проведения ПЯВ [6]

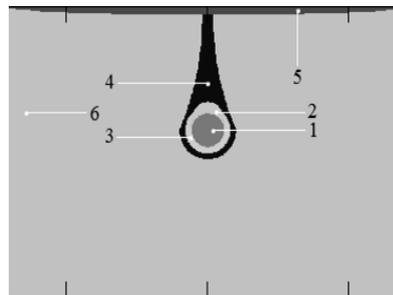


Рисунок 3. Фрагмент изучаемой модели ПЯВ (цифры – элементы модели)

Геометрические размеры и геофизические характеристики зон, включенных в модель, приведены в таблице. На дневной поверхности модели располагались 217 регистрирующих приемников. Частоты источника - 35, 60 Гц.

Таблица 1. Характеристики зон, включенных в модель ПЯВ

№	R; (a, b), м	Vp, км/с	Vs, км/с	ρ, кг/м³
1	90	2,98	1,72	2,16
2	(140, 190)	2,75	1,59	1,95
3	200	3,15	1,82	2,295
4	250	2,39	1,55	1,89
5	(724, 40)	2,83	1,63	2,025
6		3,8	2,2	2,7

Особое внимание в выбранной модели уделено зонам интенсивной трещиноватости (4), описывающей столб обрушения, и откольного разрушения (5). Для выявления характерных особенностей, создаваемых основными элементами реальной модели ПЯВ в картине волнового поля, вычислены также разностные сейсмограммы для моделей без зоны интенсивной трещиноватости и без зоны откольного разрушения (рисунок 4).

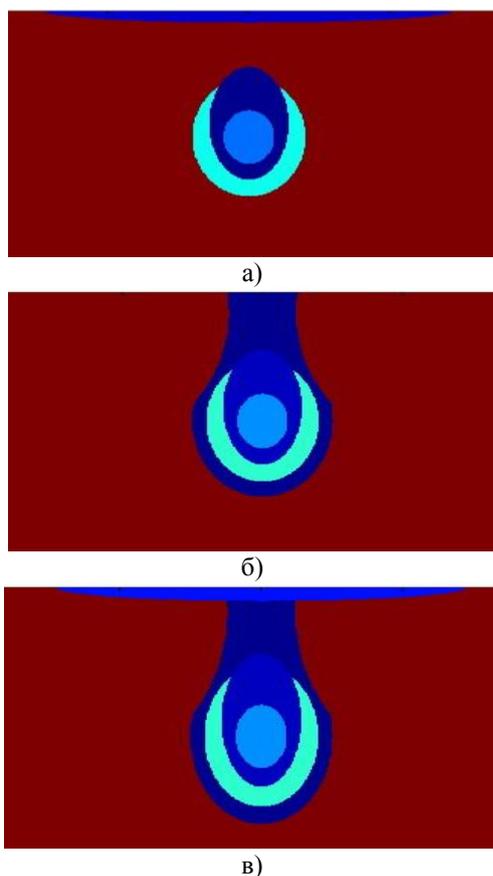


Рисунок 4. Рассчитанные модели ПЯВ: а – без зоны интенсивной трещиноватости, б – без зоны откольного разрушения, в – с учетом всех зон разрушения

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

По результатам численного моделирования получены снимки волнового поля в различные моменты времени (рисунок 5), которые отражают общую динамику распространения волнового поля в исследуемой модели.

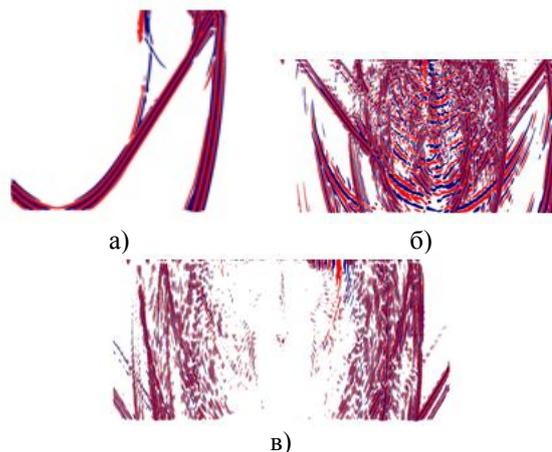


Рисунок 5. Снимки волнового поля в различные моменты времени. Частота источника 35 Гц: а – t1, б – t2, в – t3

В момент времени t2 можно наблюдать эффект резонанса в зоне интенсивной трещиноватости, представленной в виде столба, соединяющего кавернозную полость с зоной откола. На рисунке б показана синтетическая сейсмограмма, на которой можно выделить основные типы волн: 1 – прямая Р волна; 2 – поверхностная волна Рэля; 3 – Р волна, отраженная от каверны; и некоторые эффекты (4), вызванные присутствием зоны откола.

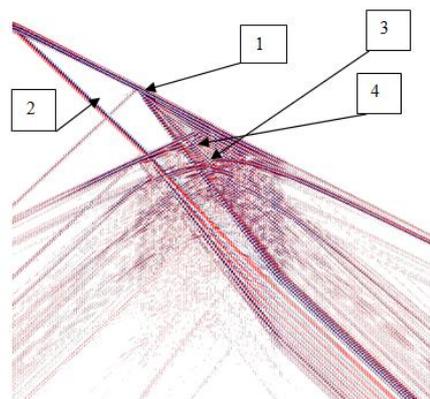


Рисунок 6. Синтетическая сейсмограмма для полной модели/ Частота источника 35 Гц

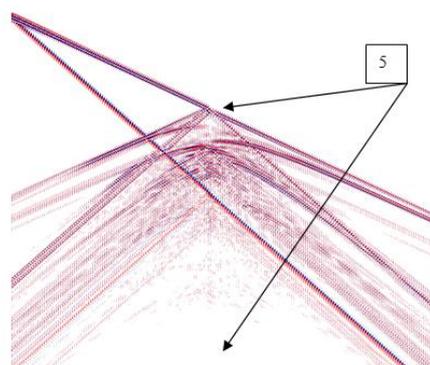


Рисунок 7. Синтетическая сейсмограмма для модели без зоны откола. Частота источника 35 Гц

Для сравнения, на рисунке 7 приведена синтетическая сейсмограмма для модели, в которой отсутствует зона откола. На сейсмограмме более заметно проявляется влияние зоны интенсивной трещиноватости (5). Основные особенности групп волн (6), порожденных зоной откола, можно увидеть на разностной синтетической сейсмограмме (рисунок 8). Важно, что под зоной откола наблюдается «зашумленность» волнового поля, что может являться характерным признаком наличия такой зоны.

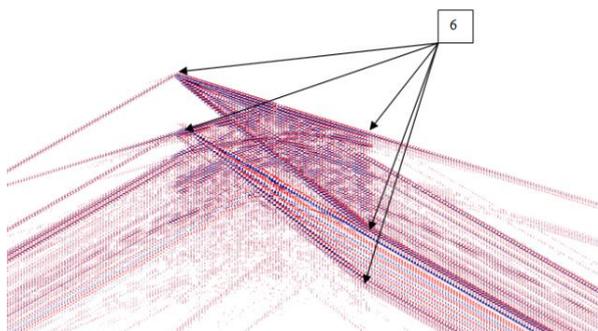


Рисунок 8. Разностная синтетическая сейсмограмма между полной моделью и моделью без зоны откола. Частота источника 35 Гц

Дальнейшие расчеты были выполнены для аналогичной модели с частотой источника 60 Гц. На рисунках 9 и 10 приведены соответственно разностные синтетические сейсмограммы: между полной моделью и моделью без зоны интенсивной трещиноватости; (рисунок 9), а также между полной моделью и моделью без зоны откола (рисунок 10).

Как следует из последних рисунков основные характерные особенности волнового поля, отмеченные на частоте зондирования 35 Гц, сохраняются и для частоты 60 Гц

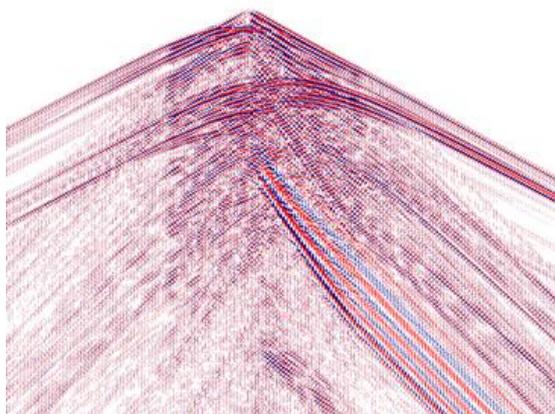


Рисунок 9. Разностная синтетическая сейсмограмма между полной моделью и моделью без зоны интенсивной трещиноватости. Частота источника 60 Гц

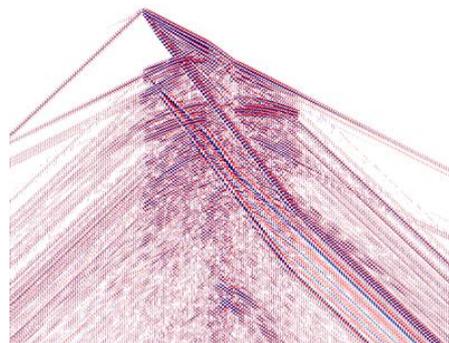


Рисунок 10. Разностная синтетическая сейсмограмма между полной моделью и моделью без зоны откола. Частота источника 60 Гц

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для решения задач Инспекции на месте в рамках ДВЗЯИ:

1. Разработана вычислительная технология для проведения численного моделирования сейсмических волновых полей в зонах проведения ядерных взрывов с использованием гибридной суперЭВМ. В качестве основных компонент созданная технология включает построитель моделей неоднородностей в виде каверн различных геометрической конфигурации и параметров, программный инструментарий для распараллеливания задач численного моделирования средствами MPI, OpenMP, а также средства визуализации сейсмического волнового поля, что позволяет изучать его динамику во времени и пространстве. В качестве источника зондирующих колебаний выступает сейсмический вибратор, охватывающий сейсморазведочный диапазон частот. Технология реализована в рамках гибридной вычислительной архитектуры в составе мультикластерной супер-ЭВМ НКС-30Т и высокопроизводительного GPU, что обеспечивает многократное повышение производительности вычислений.

2. Проведена с применением созданной технологии серия вычислительных экспериментов для различных моделей сред, кавернозных и откольных включений при заданных площадных системах наблюдения. Показано, что в волновом поле выделяются информативные группы P- и S-волн, связанные с кавернозным включением, а также откольной зоны. Представлена интерпретация полученных синтетических сейсмограмм, отражающих влияние кавернозного включения и откольной зоны на картину волнового поля.

Полученные результаты численного моделирования волновых сейсмических полей могут быть использованы при проведении экспериментов для обнаружения кавернозных полостей, при изучении мест проведения ПЯВ. Прежде всего, это относится к обоснованию методики изучения очаговых зон в интересах Инспекции на месте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арднт, Р. Проведение комплексного полевого эксперимента (ИПЭ08) ОДВЗЯИ - организации Договора о всеобщем запрещении ядерных испытаний / 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. Михайленко, Б.Г. Сейсмические поля в сложно построенных средах - Новосибирск. 1988. – 312 с.
4. 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. – Вып. 2 (18) – С. 112 – 117.
5. Глинский, Б.М. Численное моделирование распространения упругих волн в кавернозных средах / Б.М. Глинский, Д.А. Караваев, В.Н. Мартынов, М.С. Хайретдинов // Вестник НЯЦ РК, 2010. – Вып. 3. – С. 96 - 100.
6. Садовский, М.А. Избранные труды: Геофизика и физика взрыва / М.А. Садовский; Отв. ред. В.В. Адушкин // М.:Наука. – 2004. – 440 с. – ISBN 5-02-032960-6.
7. Беляшов, А.В. Скоростная структура техногенно-измененной верхней части разреза на Семипалатинском полигоне: Дис... канд. геолого-минералогических наук. – Новосибирск, 2013. – 114 с.
8. Караваев, Д.А. Параллельная реализация метода численного моделирования волновых полей в трехмерных моделях неоднородных сред / Д.А.Караваев // Информационные технологии. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2009. – № 6 (1). – С. 203 – 209.
9. Якименко, А.А. Численное моделирование распространения упругих волн в средах с подземными полостями на суперЭВМ / А.А. Якименко, Д.А. Караваев // Научный вестник НГТУ, 2013. – №2. – С. 99 - 104.

**ЖЕРАСТЫ ЯДРОЛЫҚ ЖАРЫЛЫСТАР ЗОНАЛАРЫНДАҒЫ
ТОЛҚЫНДЫҚ ӨРІСТІ САНДЫҚ МОДЕЛДЕУ**

Хайретдинов М.С., Караваев Д.А., Якименко А.А.

РФА СБ Есептеу математика және математикалық геофизика институты, Новосибирск, Ресей

Орнындағы инспекция міндеттерін шешу мүддесінде гибриді супер-ЭЕМ пайдаланып толқындық өрістерді сандық моделдеудің технологиясы көрсетілген. Есептеулерде, оларға қатысты сейсмикалық өрістердің толқындық көріністері алынған және оларды талдауы орындалған, қуыстылы зоналардың танымал моделдері пайдаланылған. Жерасты жарылыстарды жүргізу нәтижесінде пайда болатын қуыстылы зоналарды табу және тану бойынша жұмыстарда пайдалануға болатын, сейсмикалық толқындардың ақпараттылық топтары бөлінген.

**NUMERICAL SIMULATION OF WAVE FIELD IN UNDERGROUND
NUCLEAR EXPLOSIONS ZONES**

M.S. Khayretdinov, D.A. Karavaev, A.A. Yakimenko

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

The paper presents a method of numerical simulation of wave fields at a hybrid super-ECM to solve the tasks of an On-site Inspection. Well-known models of cavernous areas were used in calculations, as applied to which the wave trains of seismic fields were obtained and their analysis has been carried out. Informative groups of seismic waves, which can be used in works on detection and recognition of cavernous areas that are formed as a result of implementation of underground explosions, have been detected.