

УДК 550.34: 004.41

АЛГОРИТМЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СКОРОСТНОЙ МОДЕЛИ 2D–3D СРЕД В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА ЗОН ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ^{1,2)} Хайретдинов М.С., ¹⁾ Караваев Д.А., ^{1,2)} Якименко А.А.¹⁾ *Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия*²⁾ *Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*

Рассмотрена задача восстановления скоростной модели упругой среды при мониторинге зон подземных ядерных взрывов. Подход основан на решении набора прямых задач геофизики. Приведено краткое описание метода численного моделирования полного волнового поля, представлены результаты численных экспериментов по моделированию среды с включением в виде полости, образующейся в результате проведения подземного ядерного взрыва. Разработанное программное обеспечение предусматривает создание 2D и 3D моделей неоднородных упругих сред. Представлены результаты вычислительных экспериментов.

ВВЕДЕНИЕ

Основные задачи моделирования предусматривают создание инструментальных программных средств мониторинга кавернозных и прилегающих к ним зон подземных ядерных взрывов для слежения за временной динамикой изучаемых областей. Экологический аспект решаемых задач связан с необходимостью контроля подземных путей возможного распространения радиоактивных продуктов, образующихся при подземных ядерных взрывах. Целью разрабатываемых вычислительных технологий является:

1. Разработка и адаптация алгоритмов численного моделирования распространения упругих волн в неоднородных 2D–3D средах.

2. Разработка структурной схемы и параллельной технологии численного моделирования на гибридных архитектурах.

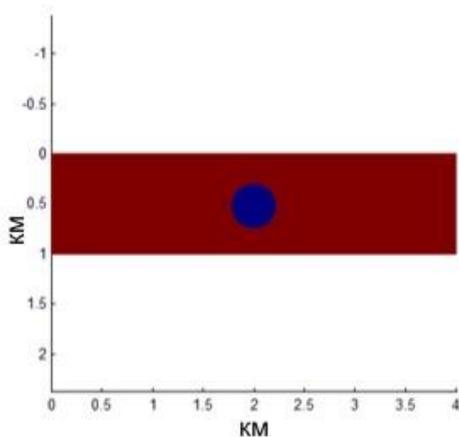
3. Проведение расчетов средствами MPI+OpenMP и MPI+CUDA для 3D моделирования распространения упругих волн в неоднородных средах на тестовых моделях.

Рассмотрены динамические задачи теории упругости по численному моделированию распространения упругих волн в 2D и 3D неоднородных средах. Решение задачи теории упругости в терминах скоростей перемещений и напряжений численно реализуется с помощью разностного метода со схемой на смещенных сетках [1, 2]. Область моделирования представляет собой параллелепипед с прямолинейной геометрией свободной поверхности в трехмерной или параллелограмм в двухмерной прямоугольной системе координат. Модель упругой среды может иметь неоднородную структуру и сложные границы сред, располагаемые внутри расчетной области. Вся область моделирования собирается из набора геометрических фигур, которые имеют аналитическое описание. Основным интерес представляют модели с включениями в виде трехмерных или двухмерных полостей, геометрия которых похожа на эллипсоид либо сферу [3–5]. Таким образом, используя разработанные программы, обеспечивается воз-

можность создавать сложные неоднородные модели с включениями и проводить численное моделирование сейсмического поля для изучения его структуры и отличительных особенностей.

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В части разработки параллельных алгоритмов численного моделирования проведено усовершенствование численного алгоритма для расчета трехмерных неоднородных моделей с трехмерными полостями. Такие модификации связаны с реализацией дополнительных граничных условий, подобных граничным условиям на свободной поверхности, применительно к геометрии границы полого включения. Поскольку основным методом выбран сеточный метод, то граница включения представляется набором прямоугольных элементов сетки. Для каждой точки границы в зависимости от геометрии расположения ее сеточных элементов для каждой точки разностной схемы определяются набор граничных условий: σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , σ_{xy} , σ_{xz} , σ_{yz} . Т. е. таким способом для каждой точки в каждом из трехмерных сечений определяется набор граничных условий. Для этого программным способом реализован дополнительный алгоритм и способ, позволяющий определить принадлежность точки граничной области или внутренней области расчетов. В качестве примера тестовой трехмерной модели была построена однородная модель с трехмерным включением - полным шаром. Область моделирования имела размеры вдоль координатных осей Ox , Oy , Oz – 4,0 км, 1,0 км, 1,0 км, соответственно, и значения упругих характеристик: $V_p = 2,2$ км/с, $V_s = 1,1$ км/с, $\rho = 2,65$ км/с. Центр включения – шар радиусом 0,22 км, – располагался в точке с координатами 2,0 км, 0,5 км, 0,52 км (рисунок 1). Источник сейсмических волн – точечный, с несущей частотой 10 Гц, располагался вблизи свободной поверхности в точке с координатами по осям Ox , Oy – 0,3 км и 0,5 км, соответственно.



срез модели в плоскости Oxz через точку расположения точечного источника сейсмических волн

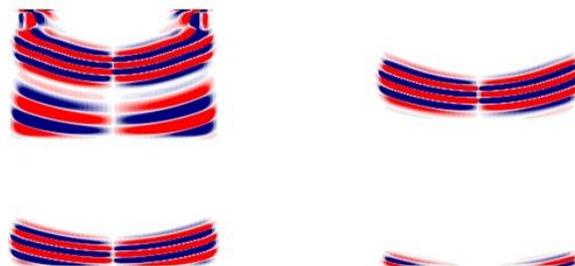
Рисунок 1. Трехмерная геометрия неоднородной упругой среды с полым включением в виде шара

Для трехмерного моделирования распространения сейсмических волн разработана программная реализация для расчетов на кластерах с MPP (Massive Parallel Processing) и SMP (Symmetric Multiprocessing) архитектурами на основе параллельного алгоритма с учетом возможностей расчетов трехмерных моделей с полостями. Для реализации параллельных расчетов на многоядерных вычислительных системах используются возможности MPI (Message Passing Interface) и OpenMP (Open Multi-Processing). MPI применяется для реализации расчетов на узлах кластера, обмена информацией между соседними вычислительными устройствами. OpenMP – для распараллеливания расчетов в рамках многоядерного вычислительного устройства. Использовалась параллельная схема на основе одномерной декомпозиции расчетной области на трехмерной подобласти вдоль координаты Oz . Для расчетов с использованием MPI и CUDA (Compute Unified Device Architecture) разработана программа для моделирование неоднородных упругих сред. В программе реализованы управление вычислительными устройствами и обмены данными для одномерного способа декомпозиции расчетной области с использованием MPI. Распараллеливание расчетной части реализовано при использовании CUDA. С такой программой можно проводить расчеты для упругих моделей сред, можно использовать и включения, которые представляют собой часть упругой среды, которые описываются аналитически и характеризуются упругими параметрами. Численное моделирование проводилось на многоядерной вычислительной системе НКК-30Т ССКЦ. Для проведения расчетов использовались CPU узлов кластера и 16 MPI потоков. По результатам трехмерного моделирования получены теоретические сейсмограммы и снимки волнового поля для различных компонент (X , Y , Z) продольных и поперечных упругих волн (рисунки 2–4).



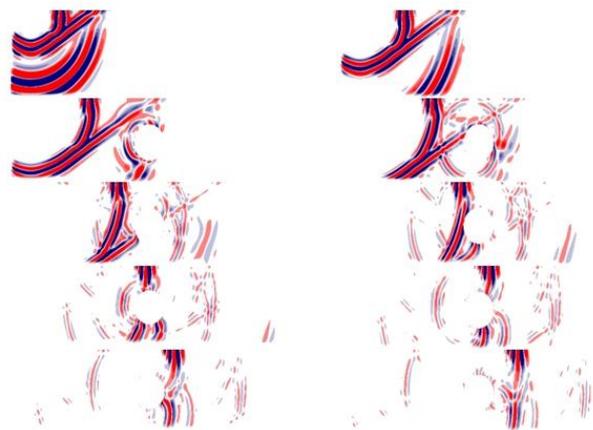
слева – по продольным волнам; справа – по поперечным волнам

Рисунок 2. Снимки U_x компоненты трехмерного волнового поля для модели в плоскости Oxz через точку расположения точечного источника сейсмических волн



слева - по продольным волнам; справа - по поперечным волнам

Рисунок 3. Снимки U_y компоненты трехмерного волнового поля для модели в плоскости Oxz через точку расположения точечного источника сейсмических волн



слева - по продольным волнам; справа - по поперечным волнам

Рисунок 4. Снимки U_z компоненты трехмерного волнового поля для модели в плоскости Oxz через точку расположения точечного источника сейсмических волн

ДВУХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

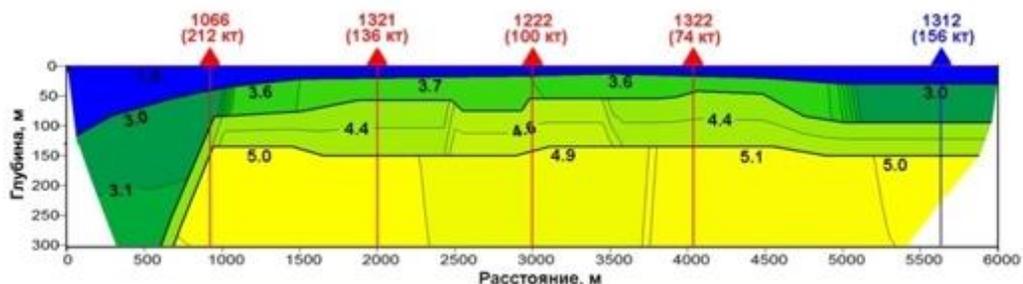
Другая задача связана с численным моделированием двухмерного поля сейсмических волн при использовании распределения значений скоростей продольной и поперечной упругих волн, полученных экспериментально на различных профилях наблюдений. Для обработки представленных графиче-

ских данных и возможности проведения расчетов сейсмических полей разработана программа, позволяющая проводить построение двухмерной геометрии модели упругой среды и получать распределение значений упругих параметров для выбранной пользователем расчетной сетки. Для задания кусочно-гладких границ в модели реализован алгоритм определения попадания точки в многоугольник. В связи с этим пользователю необходимо сформировать набор таких многоугольников путем задания набора точек, представляющих координаты в двумерной прямоугольной системе координат вершин многоугольника, а также набор значений упругих параметров для этих областей. Каждая из областей, каждый из многоугольников, представляют собой однородную упругую область, и значения упругих параметров одинаково для всех точек, принадлежащих выделенной подобласти. Общая модель представляется набором областей, представленных многоугольниками, со своими значениями параметров. Основными входными данными служат: размер сеточной модели, шаг сетки, набор координат точек и свойств для каждого многоугольника. Результатом работы программы является набор бинарных файлов с распределением значений упругих параметров на созданной расчетной сетке. Такие файлы можно открывать и просматривать на соответствие в среде Matlab. Разработана также программа для восстановления модели среды по набору данных вдоль вертикальных разрезов. В этом случае применяется алгоритм сплайн интерполяции.

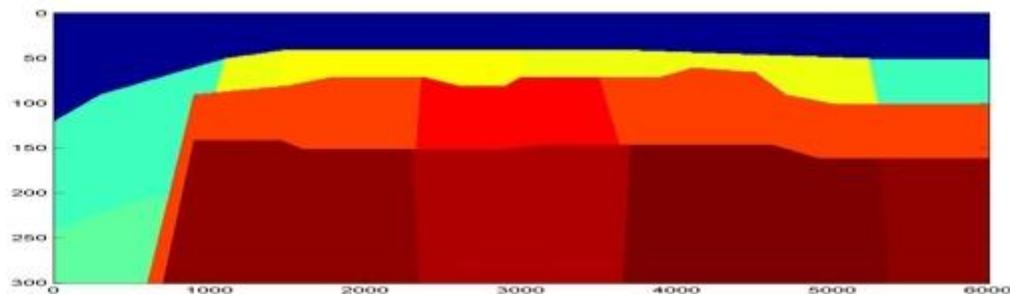
Тестирование и отладка программы проведена на примере скоростного разреза по продольным волнам профиля 0 участка Балапан Семипалатинского испытательного полигона. Размеры расчетной сетки составили 6000×300 точек. Размер области моделирования – 6000×300 м. Результаты работы программы и данные представлены на рисунке 5. На рисунке 5-а приведены графические данные, по которым выбраны координаты вершин, представляющих подобласти и значения упругого параметра. В нижней части рисунка 5 представлен результат работы программы – распределение значений параметра на расчетной сетке.

По предоставленным скважинным данным с использованием разработанного программного обеспечения проведено восстановление двухмерных моделей упругих сред для различных профилей. Использовался источник с частотой 5 Гц. На рисунке 6 представлена двухмерная упрощенная восстановленная модель упругой среды на основе алгоритма сплайн интерполяции.

Для представленного профиля проведено численное моделирование поля сейсмических волн с использованием точечного источника с различной частотой сигнала. Координаты источника по оси Oх составляли 0,5 км. Результаты моделирования для источника с частотой 15 Гц представлены на рисунке 7 (по горизонтали – ось Oх, по вертикали – ось Oz).



а) по результатам экспериментальных работ



б) по результатам численного моделирования

Рисунок 5. Построение геометрии модели и определение значений на модельной сетке на основе алгоритма задания кусочно-гладких областей

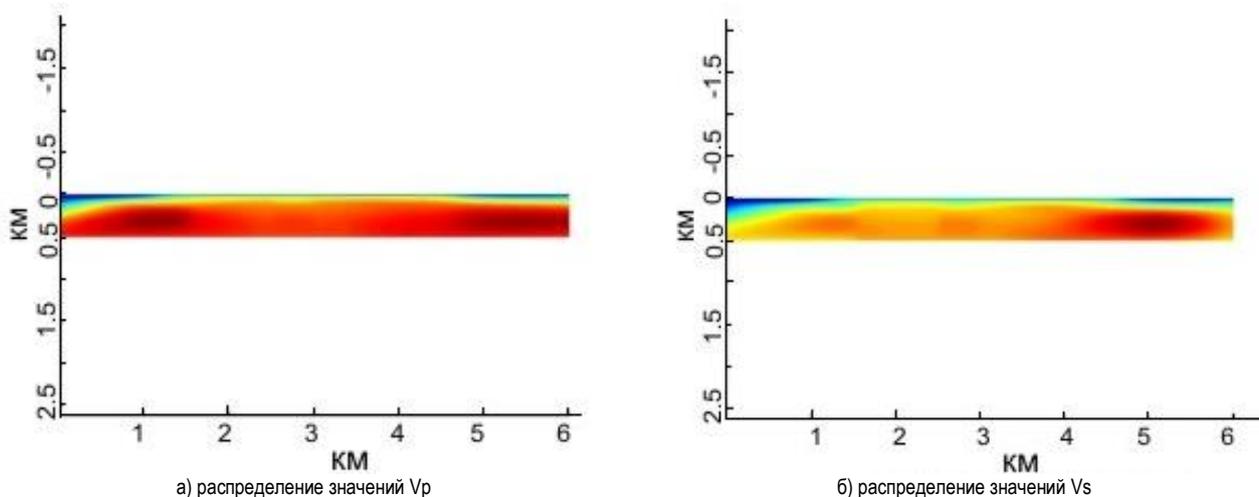


Рисунок 6. Построение геометрии модели и определение значений на модельной сетке на основе алгоритма интерполяции по вертикально распределенным данным

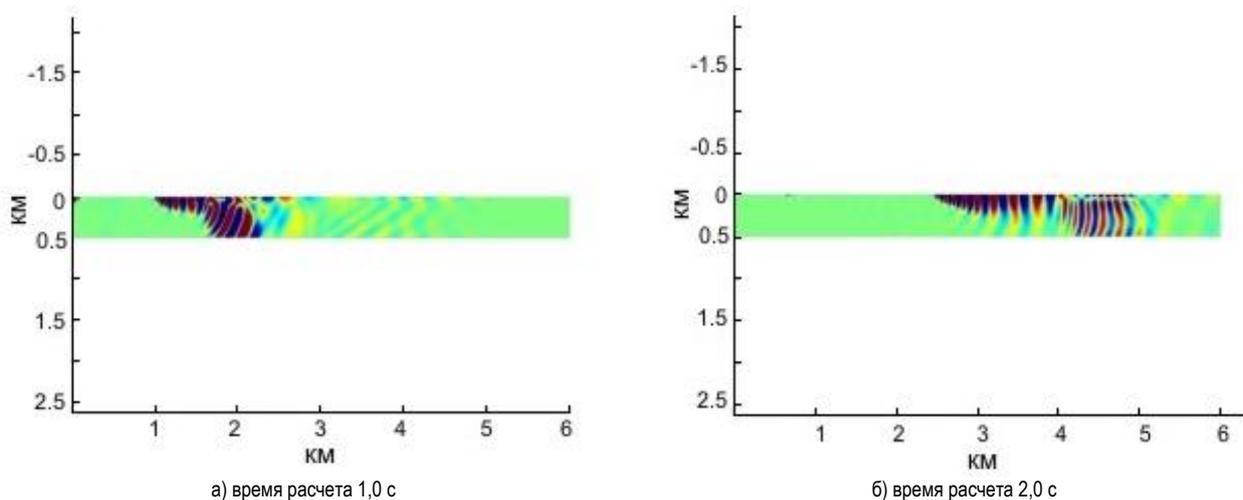


Рисунок 7. Снимки вертикальной компоненты сейсмического поля по профилю. Частота источника 15 Гц

ВЫВОДЫ

В статье представлены результаты разработки программного обеспечения для численного моделирования распространения сейсмических волн в 2D и 3D неоднородных упругих средах путем решения набора прямых задач геофизики. Программы позволяют проводить построение сеточных моделей, а именно, задаваясь геометрическим строением упругих сред, определять распределение значений упру-

гих параметров. Показана практическая применимость программ для расчета различных моделей упругих сред. Представлены результаты численных экспериментов в виде снимков волнового поля.

Работа выполнена при поддержке гранта 1760/ГФ на 2015–2017 гг. Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан.

ЛИТЕРАТУРА

1. Virieux, J. SH wave propagation in heterogeneous media: velocity-stress finite-difference method / J. Virieux // *Geophysics*, 1984. – 51. – P. 889–901.
2. Levander, A. Fourth-order finite difference P-SV seismograms / A. Levander // *Geophysics*, 1988. – 53. – P. 1425–1436.
3. Якименко, А.А. Моделирование сейсмических полей в задаче контроля и прогнозирования последствий подземных ядерных испытаний / А.А. Якименко, Д.А. Караваев, А.В. Беляшов // *Интерэкспо Гео-Сибирь*, 2015. – Т. 4. № 1. – С. 111–115.
4. Хайретдинов, М.С. Численное моделирование волнового поля в зонах подземных ядерных взрывов / М.С. Хайретдинов, Д.А. Караваев, А.А. Якименко // *Вестник НЯЦ РК*, 2014. – вып. 2. – С. 76–80.
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.

**ЖЕРАСТЫ ЯДРОЛЫҚ ЖАРЫЛЫСТАР ЗОНАЛАРДЫҢ МОНИТОРИНГІ
МІНДЕТТЕРІНДЕ 2D–3D ОРТАЛАРДЫҢ ЖЫЛДАМДЫҚ МОДЕЛЬДЕРІН
ҚАЛПЫНА КЕЛТІРУ АЛГОРИТМДЕРІ МЕН НӘТИЖЕЛЕРІ**

^{1,2)} Хайретдинов М.С., ¹⁾ Караваев Д.А., ^{1,2)} Якименко А.А.

¹⁾ *РФА СБ Есептеу математика және математикалық геофизика институты, Новосибирск, Ресей*

²⁾ *Новосибирск мемлекеттік техникалық университеті, Новосибирск, Ресей*

Жерасты ядролық жарылыстар зоналардың мониторингі тақырыптамасында серпімді ортаның жылдамдық моделін қалпына келтіру мәселесі қарастырылған. Тәсілдемесі геофизиканың тікелей міндеттері жинағын шешуінде негізделген. Толық толқындық өрісін сандық модельдеу әдісі қысқаша сипатталған, қосумен орталарды модельдеу бойынша сандық эксперименттердің нәтижелері берілген. Қосуы, жерасты ядролық жарылыс нәтижесінде пайда болатын қуыстың аналогы болып келеді. Біртекті емес серпімді орталардың 2D–3D модельдерін жасау үшін әзірленген программалық жасауы сипатталады. Эксперименттердің теоретикалық нәтижелері көрсетілген.

**ALGORITHMS AND RESULTS OF 2D-3D MEDIA VELOCITY MODEL RECONSTRUCTION
IN TASKS OF UNDERGROUND NUCLEAR EXPLOSIONS MONITORING**

^{1,2)} M. S. Khairtadinov, ¹⁾ D. A. Karavaev, ^{1,2)} A. A. Yakimenko

¹⁾ *Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of Siberian Branch RAS, Novosibirsk, Russia*

²⁾ *Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

The paper considers the problem of velocity model reconstruction of an elastic medium in the problem of monitoring the zones of underground nuclear explosions. An approach based on solving a set of forward geophysical problems is considered. For the first method, a brief description of the method for numerical simulation of the full wave field is represented. Results of numerical experiments on modeling the medium with inclusion are also presented. Inclusion is an analogue of the cavern formed as a result of underground nuclear explosion. The software for creating 2D and 3D models of heterogeneous elastic media was developed. Theoretical results of experiments are presented.