

**INTEGRATED DATABASE ON PEACEFUL NUCLEAR EXPLOSIONS  
WITHIN THE FORMER USSR**

<sup>1)</sup> A.P. Vasiliev, <sup>2)</sup> N.V. Gorin, <sup>3)</sup> Yu.V. Dubasov, <sup>4)</sup> V.A. Ilichev, <sup>4)</sup> V.V. Kasatkin

<sup>1)</sup> *International Environmental Safety Center, ROSATOM Public Council, Moscow, Russia*

<sup>2)</sup> *Russian Federal Nuclear Center– Zababakhin All-Russia Research Institute  
of Technical Physics (RFNC-VNIITF), Snezhinsk, Russia*

<sup>3)</sup> *V.G. Khlopin Radium Institute, St. Petersburg, Russia*

<sup>4)</sup> *All-Russian Research and Design Institute for Industrial Technology, Moscow, Russia*

The reference-information system that includes all results of the years-long activities (1965...1988) on peaceful nuclear explosions (PNE) in the USSR is presented. A user of this reference-information system can obtain maps of PNE sites and regions, as well as photographic, video, technological documents and facilities with violations of experiment conditions. This information system can immediately provide reference data on explosions (coordinates and well geometry of an explosion, its nearby territory and purpose, its results and characteristics, radiation situation just after a particular explosion, facility's condition at the modern stage, etc.). This reference-information system can be of great help to researchers as well as local administration bodies involved in activities of ecological safety and population awareness-building.

УДК 550.34: 004.41

**АЛГОРИТМЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СКОРОСТНОЙ МОДЕЛИ 2D–3D СРЕД  
В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА ЗОН ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ**<sup>1,2)</sup> Хайретдинов М.С., <sup>1)</sup> Караваев Д.А., <sup>1,2)</sup> Якименко А.А.<sup>1)</sup> *Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия*<sup>2)</sup> *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.

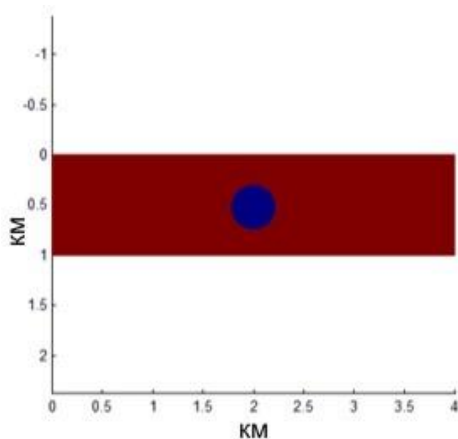
3. Проведение расчетов средствами MPI+OpenMP и MPI+CUDA для 3D моделирования распространения упругих волн в неоднородных средах на тестовых моделях.

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**

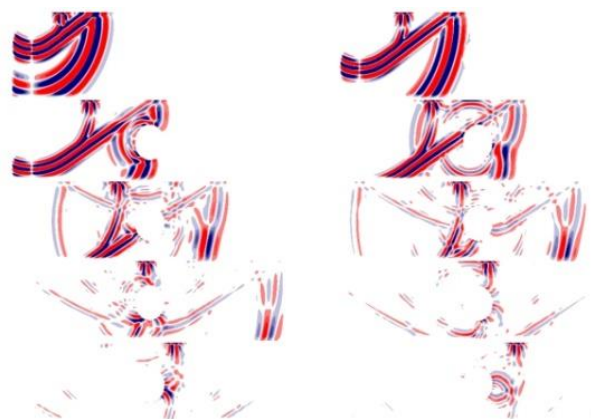
В части разработки параллельных алгоритмов численного моделирования проведено усовершенствование численного алгоритма для расчета трехмерных неоднородных моделей с трехмерными полостями. Такие модификации связаны с реализацией дополнительных граничных условий, подобных граничным условиям на свободной 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:  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$ ,  $\sigma_{xy}$ ,  $\sigma_{xz}$ ,  $\sigma_{yz}$ . 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

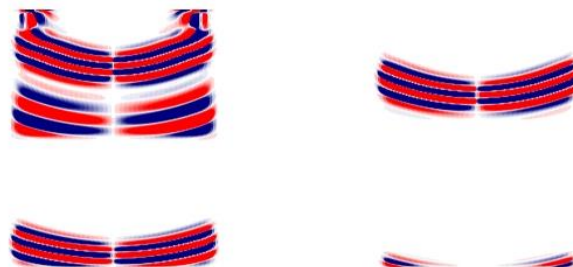
Рисунок 1. Трехмерная геометрия неоднородной упругой среды с полым включением в виде шара

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 моделирования 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 НКС-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

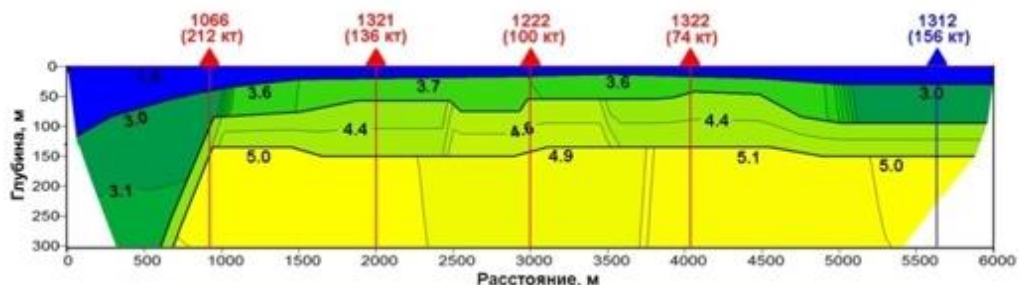
Другая задача связана с численным моделированием двухмерного поля сейсмических волн при использовании распределения значений скоростей продольной и поперечной упругих волн, полученных экспериментально на различных профилях наблюдений. Для обработки представленных графиче-

ских данных и возможности проведения расчетов сейсмических полей разработана программа, позволяющая проводить построение двумерной 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.

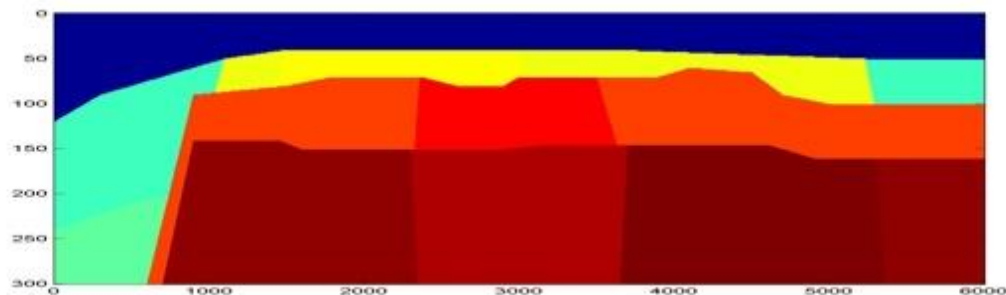
Тестирование и отладка программы проведена на примере скоростного разреза по продольным волнам профиля 0 участка Балапан Семипалатинского испытательного полигона. Размеры расчетной сетки составили  $6000 \times 300$  точек. Размер области моделирования –  $6000 \times 300$  м. Результаты работы программы 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 двумерных моделей упругих сред для различных профилей. Использовался источник с частотой 5 Гц. На рисунке 6 представлена двумерная 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

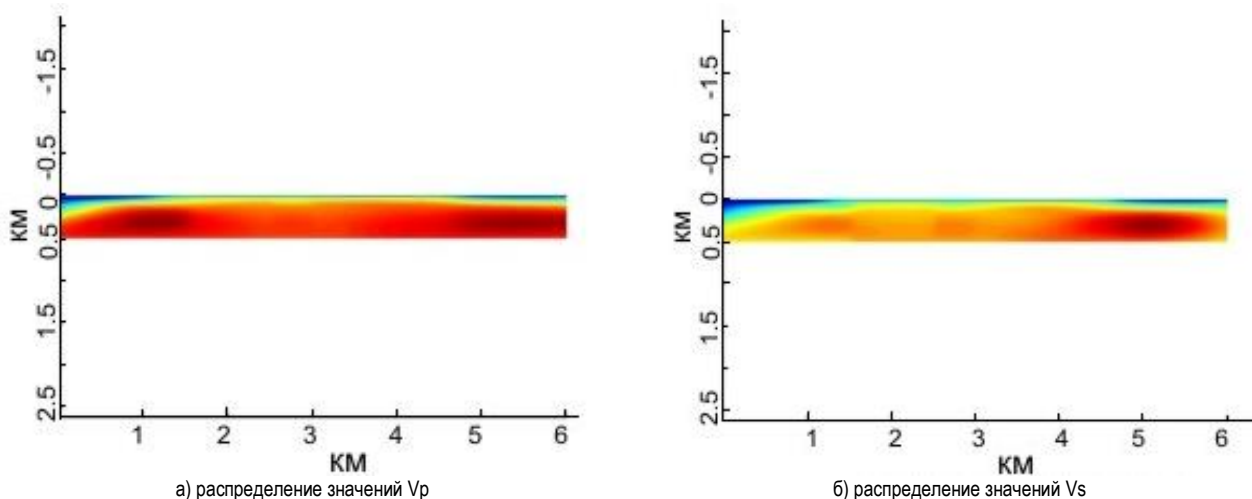


Рисунок 6. Построение геометрии модели и определение значений на модельной сетке на основе алгоритма интерполяции по вертикально распределенным данным

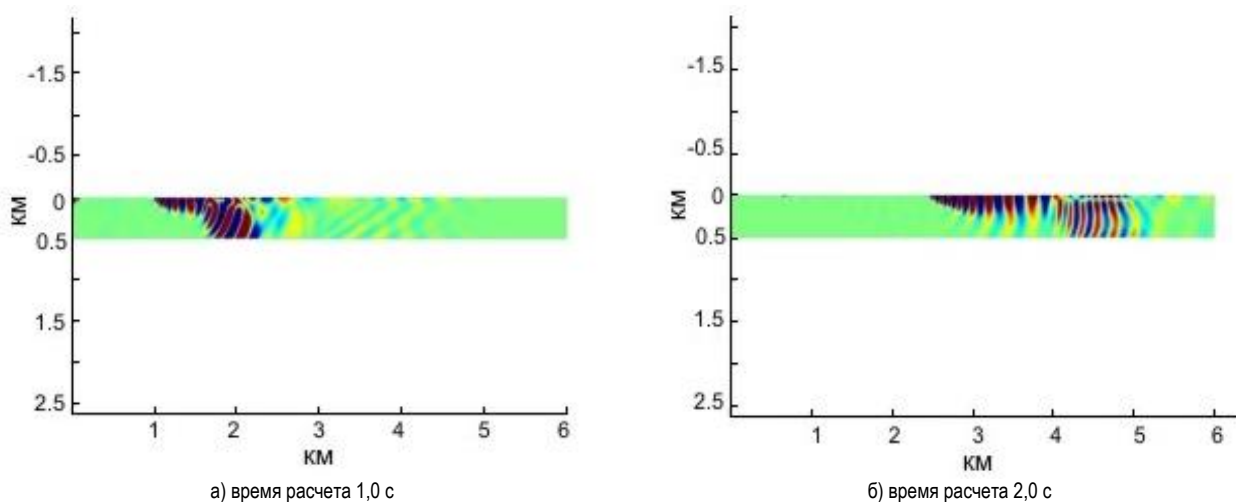


Рисунок 7. Снимки вертикальной компоненты сейсмического поля по профилю. Частота источника 15 Гц

#### 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.