

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ДЛЯ УПРУГИХ СРЕД С СУЩЕСТВЕННО НЕОДНОРОДНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ

Д. А. Караваев

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск

УДК 550.34

Рассматривается решение задачи численного моделирования распространения упругих волн в двухмерно неоднородных средах с использованием разностного метода. В работе проводится исследование работы численного алгоритма на различных модельных примерах. Разработана программа для проведения расчетов сейсмических полей на графических устройствах. Представлены результаты восстановления геометрии и распределения значений упругих параметров по разреженным данным, а также результаты расчетов поля сейсмических волн для части Байкальской рифтовой зоны. Моделирование проводилось с использованием вычислительных ресурсов центра коллективного пользования Сибирского суперкомпьютерного центра.

Ключевые слова: моделирование, сейсмические волны, рифтовая зона, разностная схема.

Введение

Одним из геофизических объектов представляющих значимость и актуальность для исследований является Байкальская рифтовая зона. На данный момент известны две непохожие друг на друга скоростные модели, построенные по результатам геофизических экспериментов Baikal Explosion Seismic Transect и Program for the Array Seismic Study of Continental Lithosphere, показывающие строение для юга Байкальской рифтовой зоны [1], [2]. Важной задачей является верификация предложенных моделей, построенных по тем или иным предположениям. Отметим, что сотрудниками ИВМиМГ СО РАН были проведены экспериментальные геофизические работы на Байкальском профиле, протяженностью несколько сотен километров, и получены экспериментальные данные в виде сейсмограмм. Данная работа представляет собой исследовательскую работу направленную на разработку алгоритмического и программного инструментария для моделирования распространения сейсмических волн в двумерно неоднородных изотропных упругих средах. Адаптированный численный алгоритм и разработанное программное обеспечение для расчета волновых полей и построения двухмерных моделей изотропных упругих сред помогает в проведении теоретических экспериментов. В работе предлагается описание постановки прямой динамической задачи геофизики для двухмерного варианта расчетов. Предлагается вниманию описание используемого конечно-разностного алгоритма численного моделирования полного сейсмического поля. С использованием разработанного программно-алгоритмического обеспечения проведены тестовые расчеты на модельных примерах. Результаты численных экспериментов показывают сходимость решения для выбранного разностного сеточного метода численного моделирования. Также проведение модельных экспериментов было необходимо для выбора оптимального количества точек разностной схемы на минимальную длину волны для получения приемлемой точности и вида результатов. В работе предлагаются вниманию результаты экспериментов в виде снимков волнового поля и теоретических сейсмограмм. Впервые проведены расчеты полного волнового поля для восстановленной по скважинным данным модели Байкальской рифтовой зоны и получены теоретические сейсмограммы. В работе также решаются задачи связанные с разработкой инструментария для восстановления модели неоднородной среды

по разреженным скважинным данным. Такие данные содержат информацию о значениях скоростных и плотностных параметров на выделенных горизонтах наблюдения. Для выполнения такой задачи реализовано программное обеспечение с использованием сплайн интерполяции для создания моделей и определения распределения значений упругих параметров на расчетной сетке. Разработан скрипт для Matlab, который позволяет провести подготовку и верифицировать данные. Для верификации алгоритма и разработанного программного обеспечения использовались вычислительные ресурсы центра коллективного пользования Сибирского суперкомпьютерного центра.

1 Постановка задачи

Решение прямой задачи геофизики связано с решением системы уравнений теории упругости. Для данной работы задача ставится в терминах компонент скоростей перемещений и напряжений. В работе рассматривается только двумерный случай, поэтому присутствуют две компоненты скоростей перемещений U_x , U_z и три компоненты напряжений σ_{xx} , σ_{zz} , σ_{xz} . В постановку задачи входят параметры упругой среды, которые не зависят от значений искомых компонент и являются двумерными функциями координат, это параметры Ламе λ , μ и плотность ρ . Задача моделирования распространения упругих волн в двумерной среде решается в прямоугольной системе координат, где ось Ox направлена слева направо, ось Oz сверху вниз. Область расчетов представляет собой прямоугольную область, в верхней част которого располагается свободная поверхность, на которой реализуются граничные условия. Задача решается при соответствующих нулевых начальных и граничных условиях.

2 Численный метод

Для численной реализации решения системы теории упругости для двумерных неоднородных упругих сред выбран конечно-разностный метод. Такой выбор связан с геометрической структурой основного исследуемого объекта. Напомним, что таковым является геофизическая модель рифтовой зоны, которая обладает очень «пестрым» рисунком распределения значений упругих параметров, при этом переходы между отдельными зонами с различными значениями параметров являются сглаженными.

Для проведения численных расчетов адаптирована конечно-разностная схема четвертого порядка аппроксимации по пространству (Levander [3]). Схема на сдвинутых сетках построены таким образом, что напряжения σ_{xx} , σ_{zz} располагаются на свободной поверхности, рис. 1 (Moczko [4]).

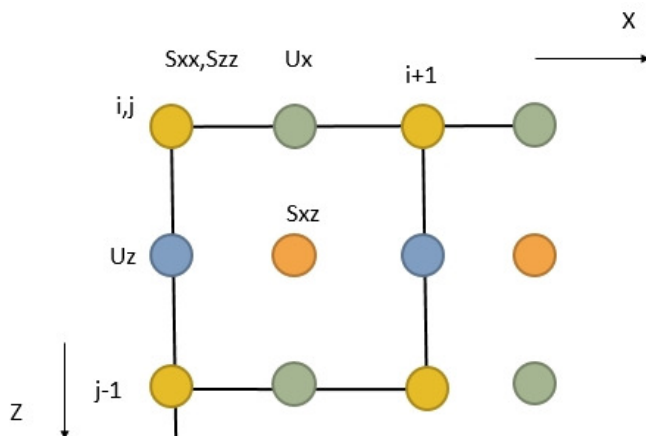


Рис. 1: Расположение основных компонент на сетке

Отметим, что при проведении моделирования могут возникать нежелательные отраженные волны от границ расчетной области. Для снижения/исключения подобных эффектов в работе использован метод реализации поглощающих границ Perfectly Matched Layers [5]. Новизна предлагаемого подхода для решения задачи теории упругости состоит в программной реализации, которая создана для проведения расчётов на графических процессорах.

3 Исследование работы численного алгоритма

В разделе рассматривается работа алгоритма численного моделирования сейсмических полей в двумерно неоднородных упругих средах и его программной реализации. Для проведения численных экспериментов для различных моделей упругих сред разработана вычислительная программа для графических процессоров. В данной реализации программа рассчитана на использование одного графического процессора. Распараллеливание расчетов производится с использованием технологии Nvidia CUDA. Для проведения расчетов используются ресурсы Центра коллективного пользования Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН в составе которого находятся вычислительные узлы с картами Nvidia GPU Tesla с 8 ГБ оперативной памяти. С технической стороны в параллельных вычислениях использовались 512 ядер GPU, при этом создавалось 1024 параллельных потока. Верификации работы численного алгоритма и программы проводилась на тестовых моделях изотропных упругих сред: однородная, слоистая неоднородная с горизонтальной ориентацией расположения слоев. В программе предусмотрена возможность использования различных типов источников сейсмических волн: точечный, вертикальная сила.

Вначале было проведено исследование для модели однородной среды. Цель исследования была понять какой оптимальное количество точек на минимальную длину волны достаточно выбрать для получения приемлемых результатов, а также проверить сходимость при увеличении числа точек сетки на минимальную длину волны. Была выбрана модель с протяженностью 50 км x 20 км с параметрами $V_p = 5.2$ км/с, $V_s = 3.0$ км/с, $\rho = 2.0$ г/см³. Рассматривались предложенные типы источников с несущей частотой 7 Гц. Источник располагался в 2 км от начала координат и на свободной поверхности в случае использования источника типа вертикальная сила и заглублен на одну длину волны в случае применения точечного источника. Во всех расчетах этой работы расположение системы возбуждения и наблюдения выбиралось одинаковым. Сейсмоприемники располагались на одной линии на свободной поверхности с шагом между ними в 5 км, и отступом первого сейсмоприемника на 5 км от источника по оси X.

По результатам проведенных модельных расчетов можно наблюдать сходимость решения, рис. 2. Видно, что происходит уточнение и формирование более четкого контура фронта сейсмических волн на основных типах волн (прямая, поверхностная). Можно предположить, что для проведения дальнейших расчетов и получения результатов приемлемой точности необходимо брать более 50 точек дискретизации разностной схемы на минимальную длину волны.

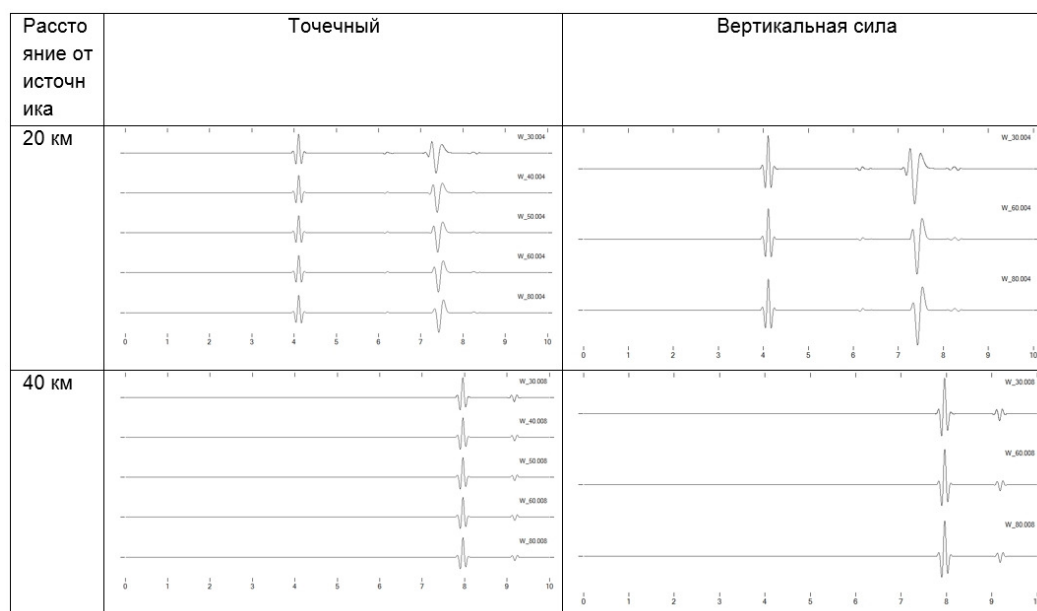


Рис. 2: Сейсмограммы для Uz компоненты на разных расстояниях и для разных типов источников сейсмических волн

Далее была построена слоистая модель с преимущественно горизонтальным расположением слоев, рис. 3. Каждый слой представляет однородную среды со своими значениями упругих параметров. Такая ориентация выбрана с тем, чтобы иметь сходство с представлением о строении рифтовой зоны. Также значения

скоростных характеристик и плотности выбраны с приближением к модели рифтовой зоны, слой 1: $V_p = 5.2$ км/с, $V_s = 3.0$ км/с, $\rho = 2.0$ г/см³, слой 2: $V_p = 6.0$ км/с, $V_s = 3.45$ км/с, $\rho = 2.0$ г/см³, слой 3: $V_p = 6.2$ км/с, $V_s = 3.6$ км/с, $\rho = 2.0$ г/см³, слой 4: $V_p = 6.65$ км/с, $V_s = 3.85$ км/с, $\rho = 2.0$ г/см³. Значения минимальной скорости S волн была выбрана 3.0 км/с, значение максимальной скорости P волн было выбрано 8.2 км/с. Результаты расчетов для источника типа "вертикальная сила" для 80 точек на длину волны представлены в виде снимков волнового поля, рис. 4, и теоретических и сейсмограмм для Uz компоненты сейсмического поля на рис. 5.

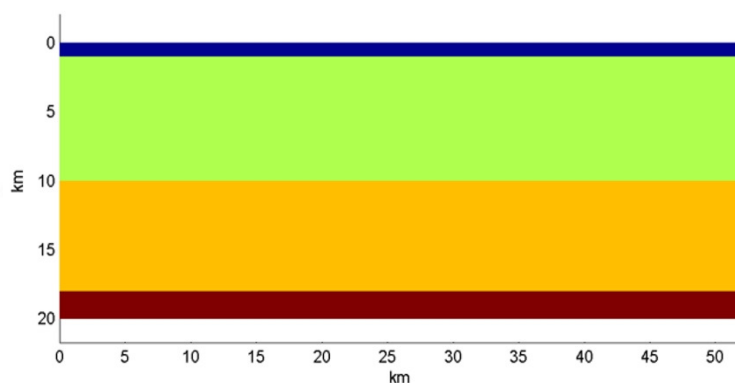
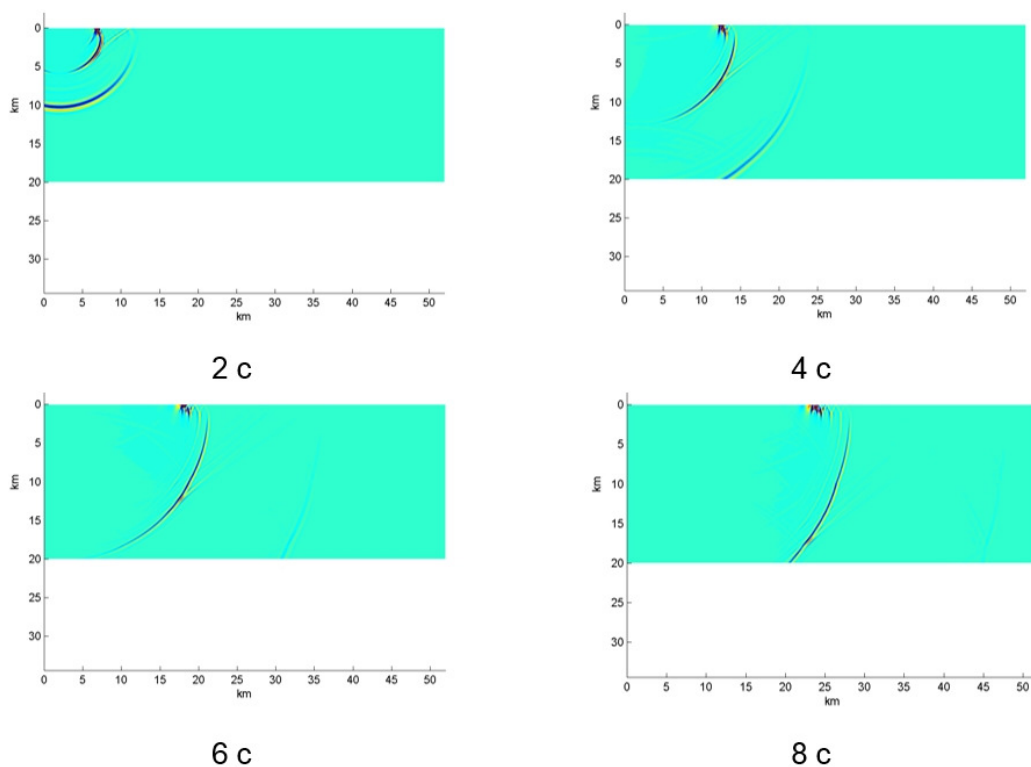
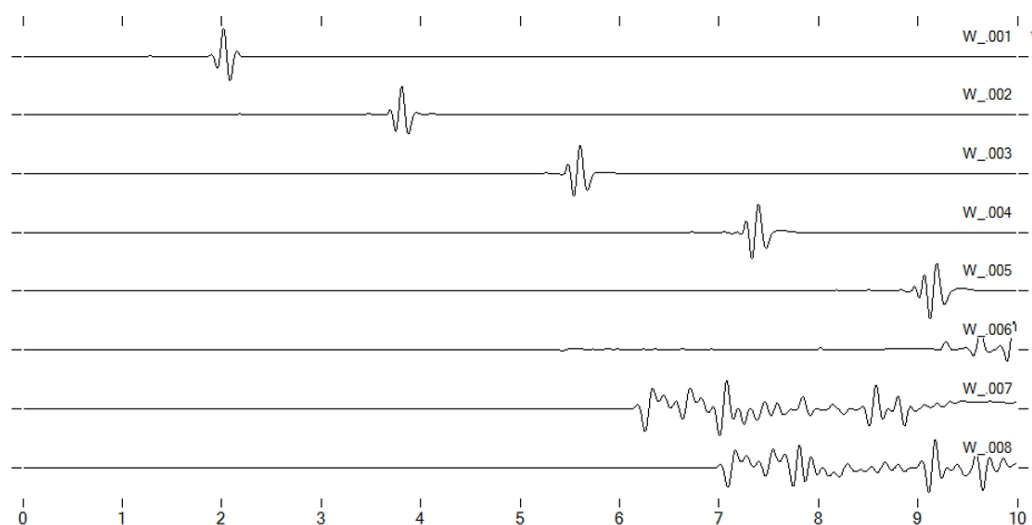


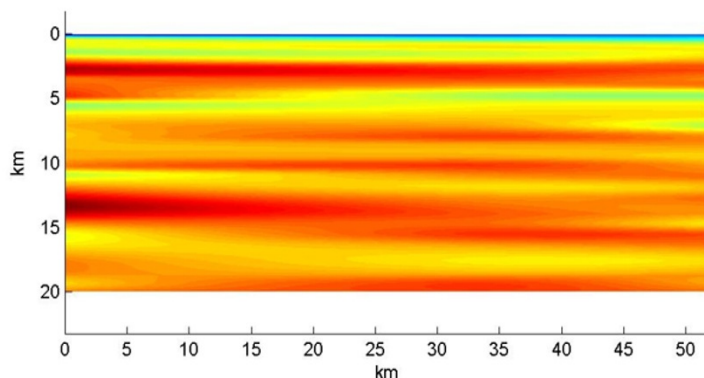
Рис. 3: Слоистая модель

Рис. 4: Снимки волнового поля для Uz компоненты для слоистой модели


 Рис. 5: Теоретические сейсмограммы для Uz компоненты для слоистой модели

4 Моделирование для рифтовой зоны

Используя разработанный инструментарий для построения неоднородных моделей упругих сред была воссоздана модель рифтовой зоны, рис. 6. Для этого используется алгоритм сплайн интерполяции [6, 7]. В качестве входных данных и опорных точек были предоставлены скважинные данные с информацией о скоростях продольной и поперечной волн, также плотности пород на выделенных глубинах. Отличительная особенность такой модели состоит в достаточно пестром рисунке распределения значений упругих характеристик и наличием неконтрастных переходов между отдельными зонами. Используя разностный метод численного моделирования распространения упругих волн и разработанную программную реализацию были получены теоретические сейсмограммы и снимки волнового поля для части рифтовой зоны, рис. 7, рис. 8. Говориться именно о части, т.к. вся модель не проходит по количеству необходимой оперативной памяти для расчетов на одном графическом процессоре. Поэтому рассмотрена часть модели размером 50 км x 20 км. Минимальная скорость S волн составила 3.0 км/с, максимальное значение скорости P волн составило 8.2 км/с и были выбраны из общей модели. Эти значения очень близки по величине к значениям для слоистой модели. Наблюдаемая картина в значительной степени отличается от картины волнового поля для слоистой модели.


 Рис. 6: Модель рифтовой зоны. Распределение значений скорости P волн.

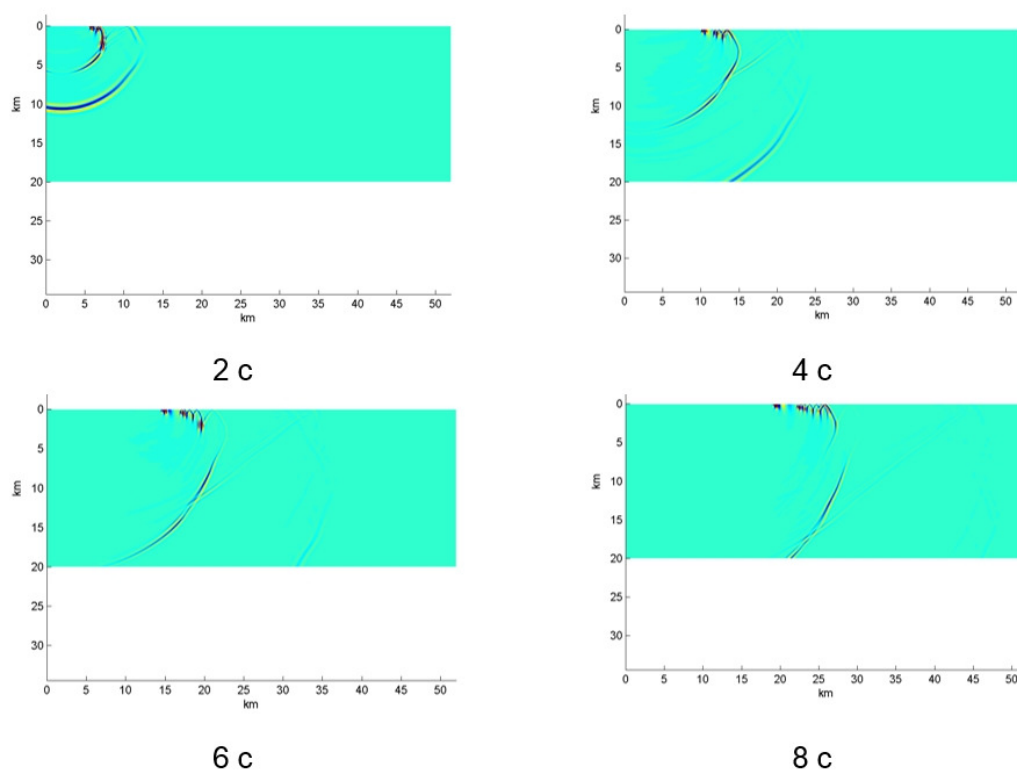


Рис. 7: Снимки волнового поля для Uz компоненты для модели рифтовой зоны

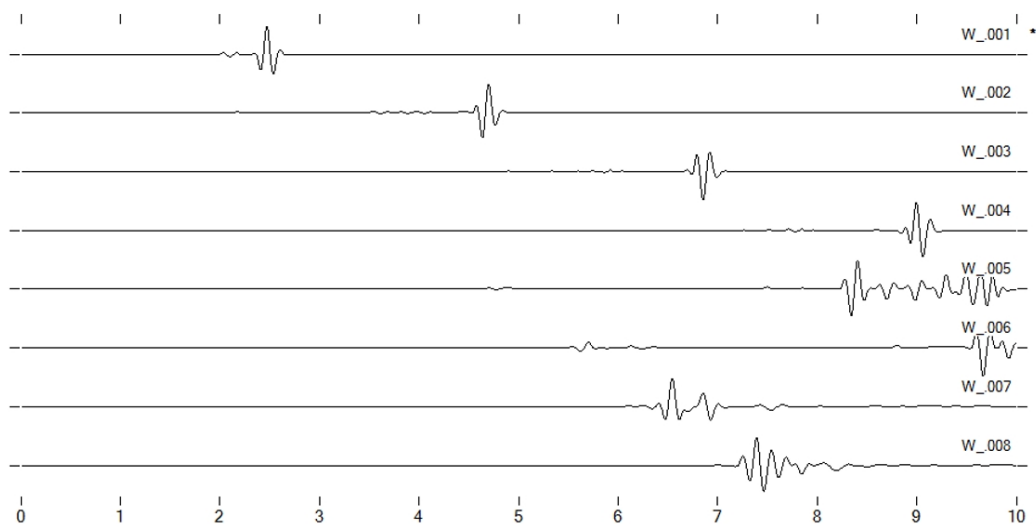


Рис. 8: Теоретические сейсмограммы для Uz компоненты для модели рифтовой зоны

Заключение

В работе представлена постановка задачи теории упругости по моделированию полного волнового поля для двухмерных неоднородных упругих сред. Предложен численный алгоритм для расчета сейсмического поля на основе разностного метода и реализации граничных условий на свободной поверхности. Предложен способ создания и восстановления моделей упругих сред при наличии разреженных начальных скважинных

данных о скоростных и плотностных свойствах среды на заданных горизонтах. На основе экспериментальных данных воссоздана модель рифтовой зоны. Для исследования работы численного алгоритма расчета волновых полей и верификации программы проведены модельные расчеты. Проведены эксперименты по выбору оптимального количества точек разностной схемы на минимальную длину волны для проведения расчетов. Расчеты проводились с использованием вычислительных ресурсов Центра коллективного пользования сибирского суперкомпьютерного центра. Представлены результаты экспериментов в виде снимков волновых полей и теоретических сейсмограмм. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для проведения моделирования распространения сейсмических волн в двухмерно неоднородных средах.

Список литературы

- [1] Nielsen C., Thybo H., Lower crustal intrusions beneath the southern Baikal Rift Zone: Evidence from full-waveform modelling of wide-angle seismic data // *Tectonophysics*, 2009, С. 298–318
- [2] В.В. Мордвинова, А.А. Артемьев Трехмерная модель юга Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий по обменным волнам // *Геология и геофизика*, 2010, т. 51, 6, С. 887–904
- [3] Levander A. Fourth-order finite difference P-SV seismograms // *Geophysics*, 53, 1988, P. 1425–1436
- [4] Moczo P., Robertsson J., Eisner L. The finite-difference Time-Domain Method for Modeling of Seismic Wave propagation // *Advances in Geophysics*, Vol. 48, 2007. P. 106
- [5] Komatitsch D., Martin R. An unsplit convolutional perfectly matched layer improved at grazing incidence for the seismic wave equation // *Geophysics*, 72, no.5, 2007. SM155–SM167
- [6] <https://ww2.odu.edu/agodunov/computing/programs/book2/Ch01/spline.f90>
- [7] <http://ww2.odu.edu/agodunov/computing/programs/fmm/spline.f>

*Караваев Дмитрий Алексеевич — к.ф.-м.н., науч.сотр. Института
вычислительной математики и математической геофизики СО РАН;
e-mail: kda@org.sscs.ru.*

Дата поступления — 15 мая 2017 г.