**Отчет по этапам НИР, завершенным в 2013 г. в соответствии с планом НИР института Проект НИР 1.3.1.3** "Методы создания, исследования и идентификация математических моделей в науках о Земле".

Номер государственной регистрации НИР 01201370229.

Руководитель – акад. РАН Михайленко Б. Г.

**Раздел 1 "**Математическое моделирование в задачах геофизики, физики океана и атмосфе

ры и охраны окружающей среды".

Руководитель – акад. РАН Михайленко Б. Г.

Исследования, проведенные в 2013 г., были направлены на повышение информативно-

сти и разрешающей способности сейсмических методов изучения сложных геологических

сред с целью прогнозирования фильтрационных потоков в кавернозно-трещиноватых

коллекторах. В рамках этой проблемы в 2013 г. решалась фундаментальная задача прогнозирования фильтрационных потоков в кавернозно-трещиноватых коллекторах на основе реконструкции их тонкой структуры путем построения волновых изображений субсейсмических объектов с комплексным использованием волновых полей различных масштабов и рассеянных волн; разработка численных методов и параллельного программного обеспечения, ориентированных на суперЭВМ с гибридной архитектурой, для решения прямых задач в рамках этих моделей.

Моделирование волновых процессов в сложноустроенных средах с неоднородностями

субсейсмического масштаба требует особого внимания. Основным методом моделирования волновых процессов в таких средах, порождающих рассеянное волновое поле, как правило, является процедура гомогенизации для построения эффективных моделей. Однако данный подход противоречит идее анализа рассеянного волнового поля, так как при гомогенизации она полностью уничтожается. В то же время именно составляющая рассеянного волнового поля несет принципиально важную информацию не только о наличии микронеоднородностей, но и об их структуре и физических параметрах. Численное моделирование рассеянных волн возможно только при использовании достаточно мелких пространственных сеток, позволяющих "ухватить" эти объекты для описания их геометрических и упругих свойств.

Очевидно, что использование таких сеток во всем объеме невозможно, оно не может быть

реализовано даже на самых мощных современных вычислительных системах. Поэтому был предложен и реализован оригинальный подход на основе построения сеток с локальным пространственно-временным измельчением. Разработанный численный метод моделирования волновых полей в разномасштабных средах и созданное на его основе программное обеспечение являются уникальными и позволяют решать практические задачи с приемлемым уровнем артефактов.

В геофизических задачах пространственное распределение мелкомасштабных неодно-

родностей точно не определено и описывается случайными полями. Поэтому решение за-

дач для сред с вариациями физических параметров на всех масштабах требует громадных

вычислительных затрат. Традиционный подход к решению задач, включающих малые мас

штабы, состоит в поиске более простой модели, требующей меньшего количества вычис-

лительных затрат. Одним из методов построения таких более простых моделей, правильно

описывающих поведение решения в крупномасштабном пределе, является метод подсеточ

ного моделирования. В рамках метода подсеточного моделирования получены эффективные коэффициенты диэлектрической проницаемости и проводимости. Коррелированные поля диэлектрической проницаемости и проводимости моделируются мультипликативными каскадами с логарифмически нормальными распределениями вероятностей. Предполагается, что длина волны много больше максимального масштаба неоднородностей среды. Полученные теоретические результаты сравниваются с результатами прямого 3D численного моделирования.

Выполнено обоснование выбора необходимых параметров расчета пошагового метода

Лагерра для решения динамических задач теории упругости.

Осуществлено дальнейшее повышение точности аналитического метода расчета вол-

новых полей. На основе аналитического метода создана компьютерная программа, позво-

ляющая проводить моделирование волновых полей для значительных пространственно-

временных масштабов, характерных для современных экспериментальных данных, в

частности, вибросейсмических. Для сейсмических исследований принципиальное значе-

ние имеет возможность идентификации первого вступления. Сложность состоит в том, что первое вступление, как правило, имеет интенсивность на несколько порядков меньшую, чем другие группы волн. Для этих целей проведена модификация аналитического метода расчета для повышения точности. Алгоритм модифицирован с целью исключения промежуточных массивов большой размерности, что обеспечивает возможность проведения расчетов для значительных пространственно-временных масштабов на "обычных"' компьютерах.

Массивы большой размерности насчитываются аналитически в процессе расчета. В алго-

ритм также введена повышенная точность расчетов, выполнено дополнительное тестирова

ние в ССКЦ и т. п. Проведенное моделирование для обобщенной модели, полученной по данным вибросейсмической экспедиции в Монголии, позволило уточнить строение коры и верхней мантии Земли.

Получены теоретические результаты, позволяющие строить схемы метода конечных

элементов для эллиптических уравнений с сингулярными коэффициентами, возникающи-

ми при осесимметричной постановке, с таким же порядком сходимости, как и для уравне-

ний с гладкими коэффициентами. Изучены вопросы численного решения МКЭ для эллип-

тического уравнения с сильным вырождением на части границы. Доказана сходимость в

весовой норме приближенного решения к точному. Для стационарной осесимметричной

задачи упругости исследованы вопросы численного решения МКЭ в подходящих весовых

пространствах. Доказана сходимость в весовой норме приближенного решения к точному.

На основе ранее разработанного подхода предложена параллельная реализация метода

декомпозиции областей. Расчеты акустических волновых полей посредством спектрально-

разностного метода подтвердили эффективность разработанных параллельных алгорит-

мов. Почти линейная зависимость величины ускорения от числа процессоров достигается

при использовании как нескольких, так и нескольких тысяч процессоров. Новизна ис-

следования заключается в том, что разработанный параллельный алгоритм для решения

блочно-трехдиагональных систем уравнений позволяет эффективно и просто реализовы-

вать экономичные численные процедуры для решения инженерных задач на суперкомпью

тере. Результаты исследования опубликованы. В рамках спектрально-разностного подхода

предложены численные процедуры для решения динамической задачи теории упругости в

присутствии криволинейной границы. Для этого исследован алгоритм с аппроксимацией

пространственных производных на гибридной сетке, которая является объединением пря-

моугольной равномерной сетки и треугольной, сгенерированной только вдоль границы об

ласти. Ширина треугольной приграничной сетки выбирается постоянной и как можно меньшей, однако такой, чтобы качество сетки было удовлетворительным

Выполненные численные расчеты для модифицированной тестовой модели среды

Canadian Foothills (рис. 1) позволили получить сейсмограммы как для акустической, так и

для упругих моделей.

В рамках численного моделирования электромагнитных полей разработаны быстрые

алгоритмы с использованием современных графических ускорителей для высокочастотных зондов, зондов на постоянном токе и зондов с тороидальными источниками. При создании параллельных программ на GPU использовались алгоритмы последовательных версий программ Суродиной и оригинальный предобуславливатель на основе алгоритма Хотеллинга

Шульца, позволяющий полностью реализовать предобусловленный метод сопряженных

градиентов для уравнений Пуассона (БКЗ) и метод эрмитового разложения для уравнений

Гельмгольца (ВИКИЗ, тороид). Для расчетов на GPU созданы: 3D программа бокового ка-

ротажного зондирования (БКЗ), 2D программа высокочастотного электромагнитного зон-

дирования (ВИКИЗ), 2D программа для высокоразрешающего электромагнитного зонда с

тороидальными катушками, 3D программа вертикального электрического зондирования.

В целом ускорение (по сравнению с последовательным вариантом) составило от 10 до 50

раз в зависимости от размерности системы.

Рис. 1. Мгновенный снимок Uz компоненты для модели среды Canadian Foothills