

Численное моделирование сейсмограмм для изучения структурных особенностей зоны перехода от внешнего к внутреннему ядру Земли

В.М. Овчинников, О.А. Усольцева

Институт динамики геосфер РАН

Земное ядро играет важную роль в физических и химических процессах, которые происходят в недрах нашей планеты. Знание особенностей распределения механических параметров внешнего жидкого ядра позволяет установить закономерности течений флюида и его роль в поддержании и эволюции магнитного поля Земли, а знание структуры внутреннего ядра может помочь понять процессы дифференциации вещества и установить химическую и минералогическую природу железа, из которого, как полагают, состоит центральная часть планеты. Основные результаты по структуре земного ядра получены на основе интерпретации сейсмических данных о дифференциальных временах пробегания и дифференциальных амплитудах волн РКРdf и волн РКРbc с точкой поворота во внутреннем и внешнем ядре соответственно.

Имеются другие, пока слабо используемые, источники получения информации о структурных особенностях зоны перехода от внешнего к внутреннему ядру Земли. Это дифрагированная на внутреннем ядре волна РКРbcdiff и РКПКР волна, отраженная от внутренней поверхности границы между внешним и внутренним ядром Земли. Наиболее предпочтительными расстояниями для наблюдения этих волн является интервал 170° - 180° , т.е. вблизи антипода. РКПКР волны чувствительны к малым вариациям скорости поперечных волн в кровле внутреннего ядра Земли, а потому рассматриваются как источник надёжных прямых измерений скорости поперечных волн во внутреннем ядре наряду с РККР волнами, прошедшими через внутреннее ядро как поперечные.

В работе представлено численное решение уравнения движения динамической теории упругости методом, который называется «решение прямой задачи» (DSM) и комбинированным аналитически-спектрально-элементным методом (AXISEM). Оба алгоритма пригодны для построения полноволновых синтетических сейсмограмм на антиподальных расстояниях с максимальной частотой 1 Гц для вязкоупругих трансверсально-изотропных сферически симметричных моделей. В DSM интегральное уравнение движения решается в частотной области в сферических координатах. При создании численной сетки в данном исследовании максимальный угловой порядок для сферических функций равен 12000, а количество точек в радиальном направлении 14000. Численное интегрирование проводится с использованием специально разработанного для этой задачи матричного оператора, который минимизирует ошибку решения для данной сетки и данного частотного диапазона. В AXISEM интегральное уравнение движения представляется в цилиндрической системе координат. Зависимость волнового поля от азимута решается аналитически. Трёхмерная задача сводится к независимым двумерным задачам. Земля разбивается на четырехугольники. Функции скорости, плотности и затухания раскладывается по базису двумерных полиномов Лагранжа. Численное интегрирование основано на использовании квадратурных формул Гаусса-Лежандра-Лобатто. Высокая точность достигается за счет специального выбора узлов интегрирования. Благодаря совместному использованию квадратурных формул Гаусса-Лежандра-Лобатто и интерполяционных полиномов Лагранжа упрощается переход от интегрального уравнения движения к дифференциальному уравнению, для решения которого используется явная конечно-разностная схема Ньюмарка второго порядка.

Расчеты теоретических сейсмограмм проводились на компьютере «Ломоносов» суперкомпьютерного комплекса НИВЦ МГУ с пиковой производительностью 1.7 Пфлопс с использованием 8-ми ядерных CPU Intel Xeon с частотой 2930МГц и памятью 1.5ГБ на ядро, а также коммуникационной сети QDR Infiniband. Программы написаны на языке Фортран. Распараллеливание организовано с использованием интерфейса MPI (Message Passing Interface). Для эпицентральных расстояний 160° - 180° и 49 станций вычисления длятся 12 ч с использованием DSM на 4 ядрах и в 6 раз меньше, т.е. 2 ч, с использованием AXISEM на 1024 ядрах. Обе программы

дают идентичные результаты в рассмотренных нами моделях переходной зоны, но сейсмограммы, рассчитанные по программе DSM, осложнены высокочастотной помехой.

В DSM выполнена автоматическая параллелизация средствами компилятора. При распараллеливании на 4 ядра полученное ускорение по сравнению с единичным ядром – в 4 раза. Дальнейшее распараллеливание неэффективно из-за больших потерь на передачу данных между ядрами. В AXISEM изначально на одном ядре выполняется разбиение Земли на элементы. Для минимального периода 1 с количество таких элементов равно 9566720, при разбиении требуется 22ГБ оперативной памяти. Элементы объединяются в 1024 области, для этого задается 8 вертикальных границ и 128 горизонтальных. Далее в AXISEM производится расчет сейсмограмм на 1024 ядрах. В кэше каждого ядра хранится информация о физических величинах только для одной области (1.9МБ). Для одного шага по времени численное интегрирование в элементах каждой области выполняется с помощью одного ядра. Такой подход обеспечивает равномерную загрузку всех ядер и минимизирует обмен информацией между ядрами. Согласно итоговой статистике вычислительная часть занимает около 56% времени работы программы, на сборку и передачу информации между ядрами уходит 24 %, задержки, связанные с ожиданием, составляют 7%. Разработчиками AXISEM установлено, что наименьшее время счета на суперкомпьютере Cray XE6 с пиковой производительностью 1.2 Пфлопс с использованием 8-ми ядерных CPU AMD с частотой 2100 МГц для минимального периода 1с достигается при использовании 8000 ядер. Для каждого элемента и одного шага по времени требуется 8 мкс машинного времени.

Тестовые вычисления проведены для глобальных моделей PREM, IASP91 и 6 моделей с измененной по отношению к IASP91 скоростью поперечных, или поперечных и продольных волн в кровле внутреннего или в подошве внешнего ядра Земли. Анализируются вспогограммы (зависимости интенсивности волны от медленности и времени), построенные по синтетическим сейсмограммам, имитирующим линейную эквидистантную группу из 11-ти сейсмоприемников с апертурой 2° на эпицентральных расстояниях 178° - 180° , а также время вступления и амплитуда волны РКПКР, определенные по одиночной записи. Для стандартных моделей интенсивность волны РКПКР больше в 1.5-2 раза по сравнению с интенсивностью волны РКРbcdiff. Вся группа изучаемых вторичных волн в 30 раз слабее по интенсивности, чем первое вступление. При уменьшении скорости продольных волн в верхней части внутреннего ядра на 4% интенсивность волны РКПКР возрастает и становится слабее первого вступления только в 6.7 раза, время пробега РКПКР увеличивается на 3.5 с. При наличии слоя толщиной 100 км с уменьшенной на 10% скоростью продольных волн во внешнем ядре существенно возрастает амплитуда волны РКРbcdiff, ее интенсивность в 11 раз больше интенсивности РКПКР,

Сравнения экспериментальных сейсмограмм с рассчитанными представлено на рис.1. Наблюдается хорошее согласие для волны РКПКР с моделью IASP91 на рис.1а. С помощью синтетических сейсмограмм удастся визуально идентифицировать фазу РКПКР на рис.1б. Увеличенная амплитуда РКПКР на экспериментальной записи (рис.1б) свидетельствует о возможно более низкой скорости поперечных волн во внутреннем ядре под Западной Канадой. На сейсмограммах землетрясения, зондирующего область внутреннего ядра под Китаем (рис.1в), обнаружены аномально большие амплитуды волн РКРbcdiff и РКПКР, которые, как следует из расчетов синтетических сейсмограмм, могут быть связаны с более низкой на 2% по сравнению с IASP91 скоростью продольных волн в основании внешнего ядра и пониженной до 1км/с скоростью поперечных волн в вершине внутреннего ядра.

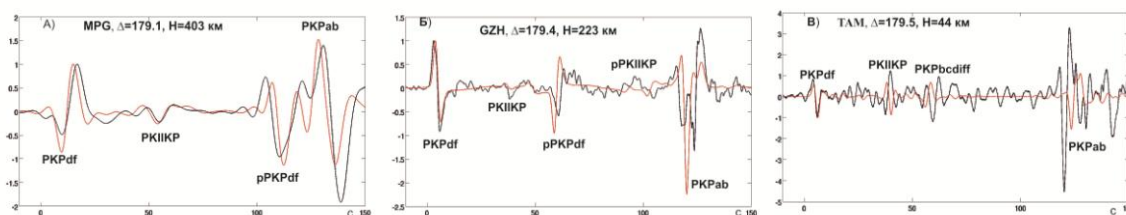


Рис.1. Сравнение экспериментальных сейсмограмм и синтетических для землетрясения а) 27/01/2006 16:58 UTC, станции MPG и модели IASP91, б) 11/02/2015 18:57 UTC, станции GZH и модели IASP91, в) 15/09/2001 15:04 UTC, станции TAM и модификации IASP91.