

УДК 550.341

ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ

© 2019 г. А. С. Фомочкина*, Б. Г. Букчин

Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: nastja_f@bk.ru

Поступила в редакцию 29.06.2017 г.

Принята в печать 28.05.2018 г.

Определение фокального механизма и глубины очага землетрясения прямым перебором их возможных значений на сетке в параметрическом пространстве позволяет также оценить уровень их разрешения. Но такой подход в случае достаточно высокой детальности перебора требует значительных затрат компьютерного времени. В качестве примера источника, требующего использования детальной сетки, рассматривается частный случай мелкофокусного землетрясения, одна из нодальных плоскостей которого субгоризонтальна. Для изучения таких событий по длиннопериодным записям поверхностных волн требуется использование сетки с высокой детальностью по углам фокального механизма. В работе обсуждается применение параллельных вычислений для ускорения расчета параметров землетрясения и представлены результаты использования этого метода для изучения сильнейшего афтершока землетрясения в Тохоку.

Ключевые слова: фокальный механизм, мелкофокусное землетрясение, параллельные вычисления

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019268-75>

ВВЕДЕНИЕ

Исследование особенностей излучения длиннопериодных поверхностных волн мелкофокусным землетрясением, проведенное в работах [Букчин, 2006; Bukchin *et al.*, 2010], показало, что в случае, когда одна из нодальных плоскостей источника субгоризонтальна, небольшие изменения ее угла падения существенно меняют диаграмму поверхностно-волнового излучения такого очага и оценку моментной магнитуды события. Пример такого изменения диаграммы излучения фундаментальной моды волны

Лява на периоде 200 с в зависимости от величины угла падения δ приведен на рис. 1. Источники представляют собой сдвиги по простиранию с различными значениями угла падения δ и фиксированными значениями угла простирания ($\psi = 0^\circ$), угла подвижки ($\lambda = 0^\circ$) и глубины источника ($h = 30$ км). В верхнем ряду указаны текущие значения угла падения, в среднем ряду приведены соответствующие фокальные механизмы, а в нижнем ряду – соответствующие диаграммы излучения волны Лява. Как видно из рисунка, при изменении угла падения от 90°

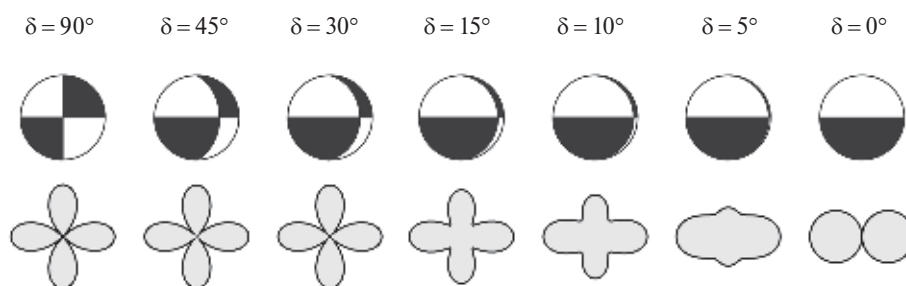


Рис. 1. Диаграммы излучения фундаментальной моды волны Лява мелкофокусным источником, представляющим собой сдвиг по простиранию, для различных значений угла падения δ .

до 15° диаграмма излучения волны Лява почти не меняется, и лишь на последних десяти градусах, когда одна из нодальных плоскостей становится субгоризонтальной, небольшие изменения фокального механизма существенно меняют диаграмму поверхностно-волнового излучения. Как следствие, применяемые к таким событиям методы оценки углов фокального механизма должны обеспечивать достаточно высокий уровень их разрешения.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКАЛЬНОГО МЕХАНИЗМА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ, ЕГО ГЛУБИНЫ И СЕЙСМИЧЕСКОГО МОМЕНТА ПО ДЛИННОПЕРИОДНЫМ АМПЛИТУДНЫМ СПЕКТРАМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

Наиболее интенсивные смещения земной поверхности, регистрируемые сейсмическими станциями, наблюдаются в поверхностных волнах. Каждая из таких волн является результатом свертки соответствующей функции Грина, определяемой строением среды вдоль пути распространения волны, и тензора плотности сейсмического момента, характеризующего неупругие процессы, происходящие в очаге землетрясения [Backus, Mulcahy, 1976]. При расчете функции Грина мы используем модель среды со слабой горизонтальной неоднородностью [Woodhouse, 1974; Бабич и др., 1976]. Поверхностно-волновая функция Грина для такой модели зависит от параметров среды в окрестности очага и в окрестности точки регистрации, от средней вдоль луча фазовой скорости волны, от ее геометрического расхождения и затухания. При этом амплитудный спектр смещений в поверхностной волне не зависит от ее фазовой скорости. Скорости поверхностных волн в реальной Земле не известны с достаточной точностью. Поэтому, как правило, мы используем для определения параметров источника лишь амплитудные спектры поверхностных волн. Детальное описание метода и примеры применения можно найти в работах [Букчин и др., 1992; Lasserre et al., 2001; Букчин и др., 2015].

Описывая источник в приближении тензора момента, мы рассматриваем мгновенную точечную сдвиговую дислокацию (двойной диполь) на глубине h . Такой источник задается пятью параметрами: его глубиной, фокальным механизмом, определяемым тремя углами (простираания ψ , падения δ и подвижки λ) и сейсмическим моментом M_0 . Четыре первых параметра

мы определяем прямым перебором их возможных значений на сетке в параметрическом пространстве, а пятый параметр M_0 — минимизируя отличия (невязку ε) наблюдаемых амплитудных спектров от их теоретических значений для каждой текущей комбинации значений остальных параметров. Детальность сетки для углов фокального механизма может достигать одного градуса. Значения параметров, минимизирующие невязку, мы рассматриваем как оценки этих параметров. Для оценки степени разрешения каждого из этих четырех параметров мы строим четыре частные функции невязки: $\varepsilon_h(h)$, $\varepsilon_\psi(\psi)$, $\varepsilon_\delta(\delta)$ и $\varepsilon_\lambda(\lambda)$. Осуществляя перебор возможных значений параметров, мы рассматриваем лишь ту из двух нодальных плоскостей, которая падает круче. Ее угол падения не может быть меньше 45° , и его область значений определяется неравенствами $45^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$.

Как известно, фокальный механизм не может быть однозначно определен из амплитудных спектров поверхностных волн. Для каждого двойного диполя существует три эквивалентных ему двойных диполя, излучающих поверхностные волны с тем же амплитудным спектром. Эти четыре эквивалентных решения представляют две пары механизмов, повернутых относительно друг друга вокруг вертикальной оси на 180° , и в каждой паре отличающиеся друг от друга противоположным направлением подвижки. Поэтому частные функции невязки амплитудных спектров для углов простираания и подвижки являются периодическими с периодом 180° . Для выбора одного из четырех эквивалентных фокальных механизмов мы сравниваем синтетические фазовые спектры поверхностных волн на очень длинных периодах (обычно не короче 100 с), рассчитанные для каждого из этих четырех решений, с наблюдаемыми фазовыми спектрами. В качестве оптимального фокального механизма выбирается тот, для которого эти спектры наиболее близки.

ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

По описанному выше алгоритму была написана программа с распараллеливанием вычислений (данную программу MomTens_omp можно скачать с сайта ИТПЗ РАН <http://mitp.ru/en/soft>). Одним из наиболее популярных средств параллельного программирования для компьютеров с общей памятью в настоящее время

является технология OpenMP. Данная технология базируется на традиционных языках программирования, таких как Си, Си++ и Фортран. За основу берется последовательная программа, а для создания ее параллельной версии используется набор директив, функций и переменных окружения. Предполагается, что создаваемая параллельная программа будет переносимой между различными компьютерами с разделяемой памятью, поддерживающими OpenMP. Технология

OpenMP нацелена на то, чтобы пользователь имел один вариант программы для параллельного и последовательного выполнения [Антонов, 2009]. Здесь мы рассматриваем возможность применения данной технологии для ускорения процесса определения параметров очага землетрясения по спектрам поверхностных волн. В общем виде алгоритм работы программы представлен на блок-схеме на рис. 2. Как видно из блок-схемы самым внешним циклом является

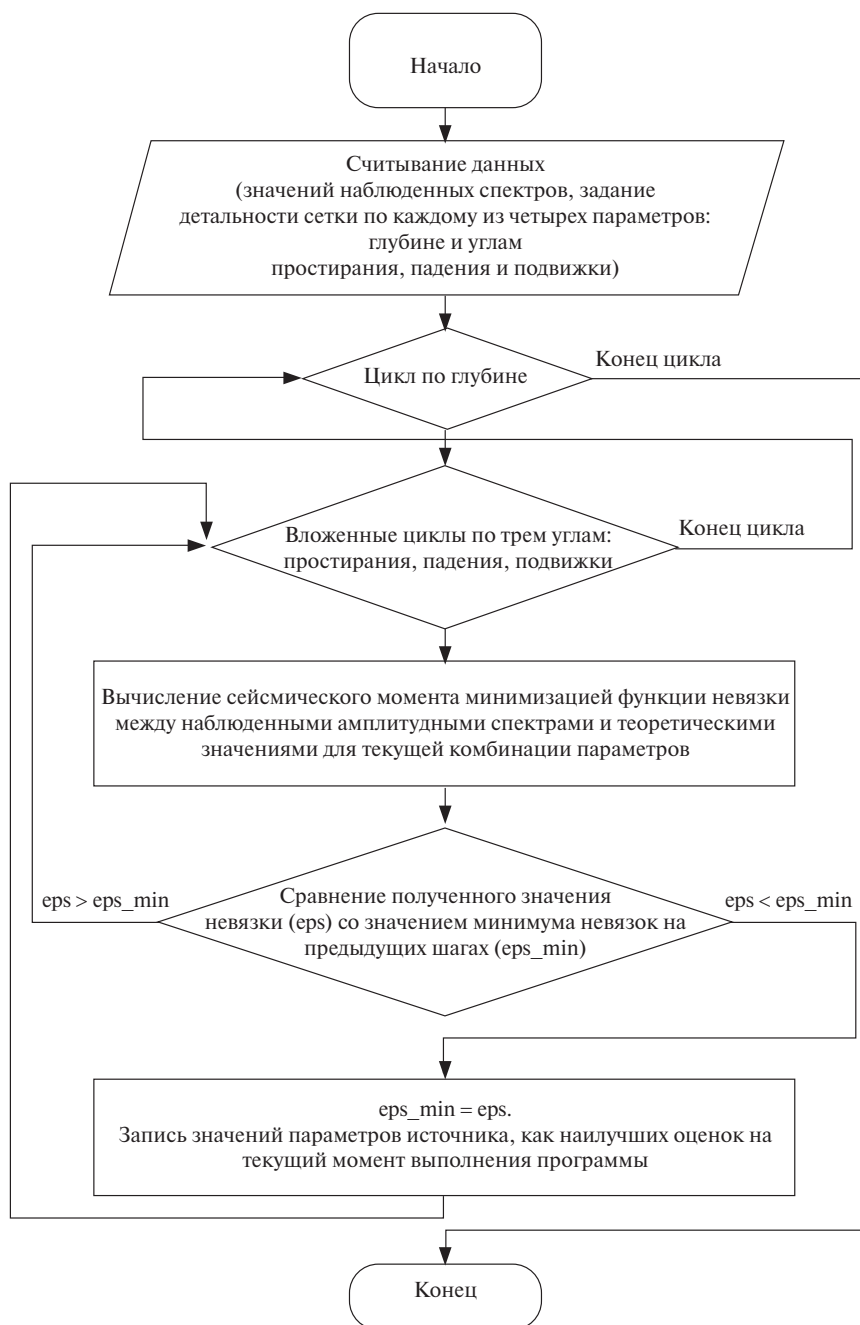


Рис. 2. Блок-схема работы программы.

цикл по глубине. Именно по данному циклу проводится распараллеливание. Как описывалось выше, технология OpenMP представляет собой распараллеливание приложений на многопроцессорных системах с общей памятью, в нашем случае – на ядрах одного процессора. Программа начинается с последовательной области – сначала работает один процесс (нить), при входе в параллельную область порождается еще некоторое число процессов, между которыми в дальнейшем распределяются части программы. Итерации цикла по глубине распределяются на максимальное количество ядер и выполняются независимо на каждом из них за исключением критических секций. Под критической секцией подразумевается такая часть программы, которая может исполняться не более, чем одной нитью. Если критическая секция уже выполняется какой-либо нитью, то все другие нити, выполнившие директиву для секции с данным именем, будут заблокированы, пока вошедшая нить не закончит выполнение данной критической секции. Как только работавшая нить выйдет из критической секции, одна из заблокированных на входе нитей войдет в нее. Если на входе в критическую секцию стояло несколько нитей, то случайным образом выбирается одна из них, а остальные заблокированные нити продолжают ожидание [Антонов, 2009]. Мы используем критические секции для работы с глобальными (общими для всех ядер) минимумами невязок. Это необходимо для предотвращения одновременной перезаписи глобальных минимумов несколькими нитями, когда несколько текущих локальных минимумов меньше текущего глобального минимума.

**СИЛЬНЕЙШИЙ АФТЕРШОК
ЯПОНСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ
В ТОХОКУ, 11.03.2011 г., $M_w = 8.4$.**

Описанный подход был использован для изучения сильнейшего афтершока землетрясения в Тохоку, произошедшего через полчаса

после основного толчка. В результате его записи оказались сильно зашумленными излучением предшествующего главного события. С помощью программы спектрально-временного анализа СВАН мы отфильтровали в полосе периодов от 100 до 200 с и использовали для определения параметров изучаемого события фундаментальные моды Лява и Рэлея, зарегистрированные 13 станциями сетей IRIS, GEOSCOPE и GEOFON. Расположение этих станций приведено на рис. 3а. Шаг сетки для углов фокального механизма был выбран равным 1° . В таблице представлены фокальные механизмы и фазовые невязки для четырех эквивалентных решений, полученных из анализа амплитудных спектров поверхностных волн. Как видно из таблицы, оптимальным является решение 1, приведенное на рис. 3б. Полученные значения углов простирания, падения и подвижки: 33° , 89° и 91° , соответственно. Полученное значение сейсмического момента равно $0.46 \cdot 10^{22}$ Нм. Это значение соответствует значению моментной магнитуды $M_w = 8.4$. Наша оценка глубины наилучшего точечного источника равна 10 км. Частные функции невязки для глубины источника и для углов фокального механизма, характеризующие их разрешение, приведены на рис. 4.

Обе версии программы (без распараллеливания и с распараллеливанием) были отхронометрированы на использованных записях сильнейшего афтершока Тохоку. Время работы программы без распараллеливания оказалось равным 99 минутам, с распараллеливанием на 2 ядра (каждое ядро – 2 потока) – 41-й минуте. Как видим, время работы программы уменьшилось больше чем в 2 раза (количество ядер), но меньше чем в 4 раза (количество потоков). Это связано с несколькими факторами. Во-первых, в программе помимо параллельной части есть еще последовательные, связанные со считыванием данных, критическими секциями, записью и выводом результатов. Во-вторых, стоит отметить, что потоки не эквивалентны ядрам. В отличие от «настоящих» ядер,

Таблица. Фокальные механизмы и фазовые невязки для четырех эквивалентных решений, полученных из анализа амплитудных спектров поверхностных волн

Номер решения	Угол падения, град	Угол простирания, град	Угол подвижки, град	Нормированная фазовая невязка
1	89	33	91	0.345
2	89	213	91	0.483
3	89	213	-89	0.621
4	89	33	-89	0.717

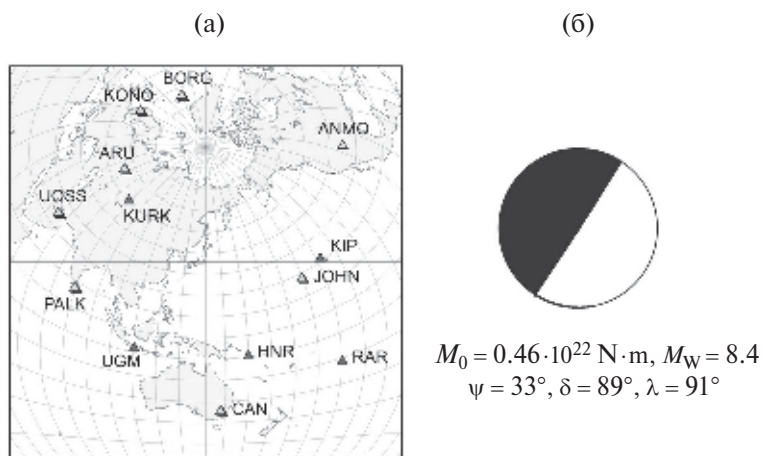


Рис. 3. Распределение точек регистрации поверхностных волн (а) и наилучшее из четырех эквивалентных решений (б), полученных по амплитудным спектрам поверхностных волн. Темные треугольники соответствуют волнам Рэлея, светлые треугольники – волнам Лява.

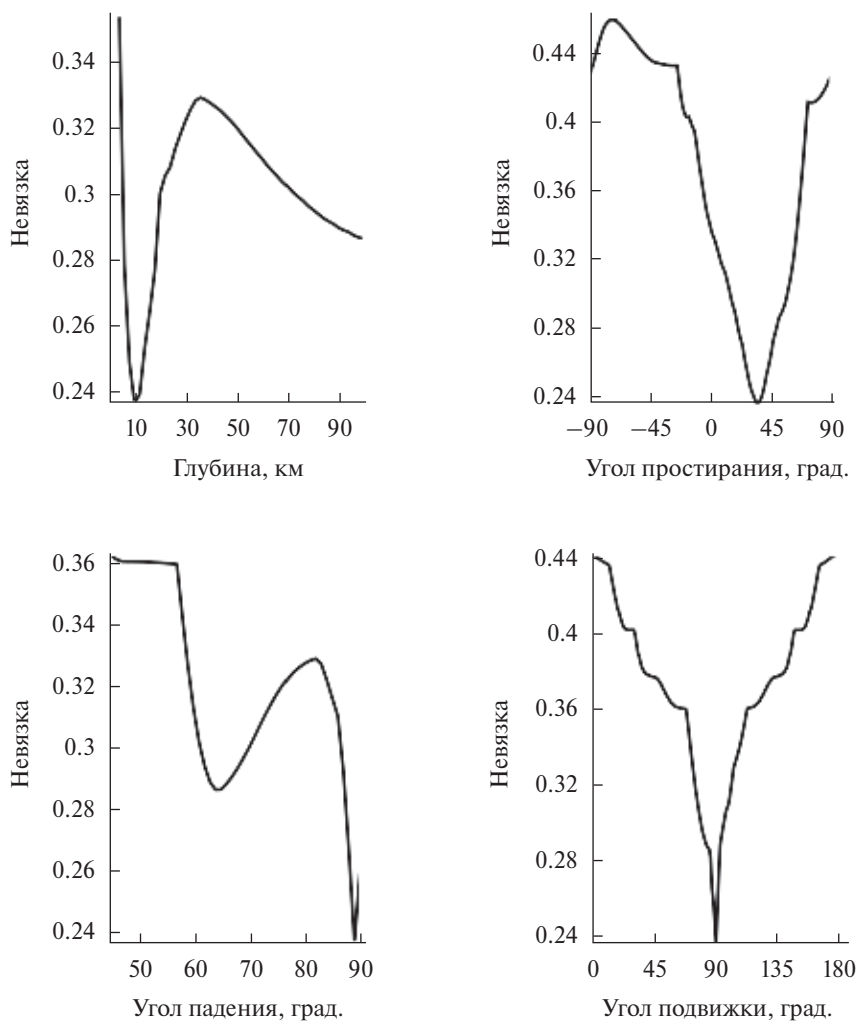


Рис. 4. Частные функции невязки для глубины источника и углов фокального механизма.

являющихся полными и независимыми копиями, в случае многопоточности в одном процессоре дублируется лишь часть внутренних узлов, в первую очередь отвечающих за хранение и подготовку данных. Исполнительные же узлы, ответственные за организацию и обработку данных, остаются в единственном числе, и в любой момент времени используются максимум одним из потоков.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ С СМТ-РЕШЕНИЕМ

Сравним полученное решение с решением из Глобального СМТ-каталога (решение ГСМТ). Но вначале рассмотрим проблему выбора спектрального диапазона наблюдений. При перемещении этого диапазона из области периодов, недостаточно длинных для использования приближения точечного мгновенного источника, в область более длинных периодов оценки параметров очага существенно изменяются. Когда же периоды становятся достаточно длинными и указанное приближение – адекватным,

оценки параметров принимают свои предельные значения и перестают изменяться с дальнейшим ростом периодов. Соответствующая иллюстрация для сильнейшего афтершока землетрясения в Тохоку приведена на рис. 5а, 5б, 5в. Здесь изображены решения, полученные из одного и того же набора записей поверхностных волн, отфильтрованных в трех разных спектральных диапазонах.

Сравним теперь решение, приведенное на рис. 5в, с ГСМТ-решением, представленном на рис. 5г. Эти решения существенно различаются. Так полученная нами оценка M_w равна 8.4, в то время как ГСМТ-оценка M_w равна 7.9. Заметим, однако, что сравниваемые решения получены по записям поверхностных волн, отфильтрованных в разных спектральных диапазонах. Если же мы сравним ГСМТ-решение ($T > 75$ с) с решением, приведенном на рисунке 5а ($75 \text{ с} < T < 120 \text{ с}$), то увидим, что эти решения весьма близки. Но как было отмечено выше, диапазон периодов $75 \text{ с} < T < 120 \text{ с}$ является недостаточно длиннопериодным для рассматриваемого события. Это дает нам основание

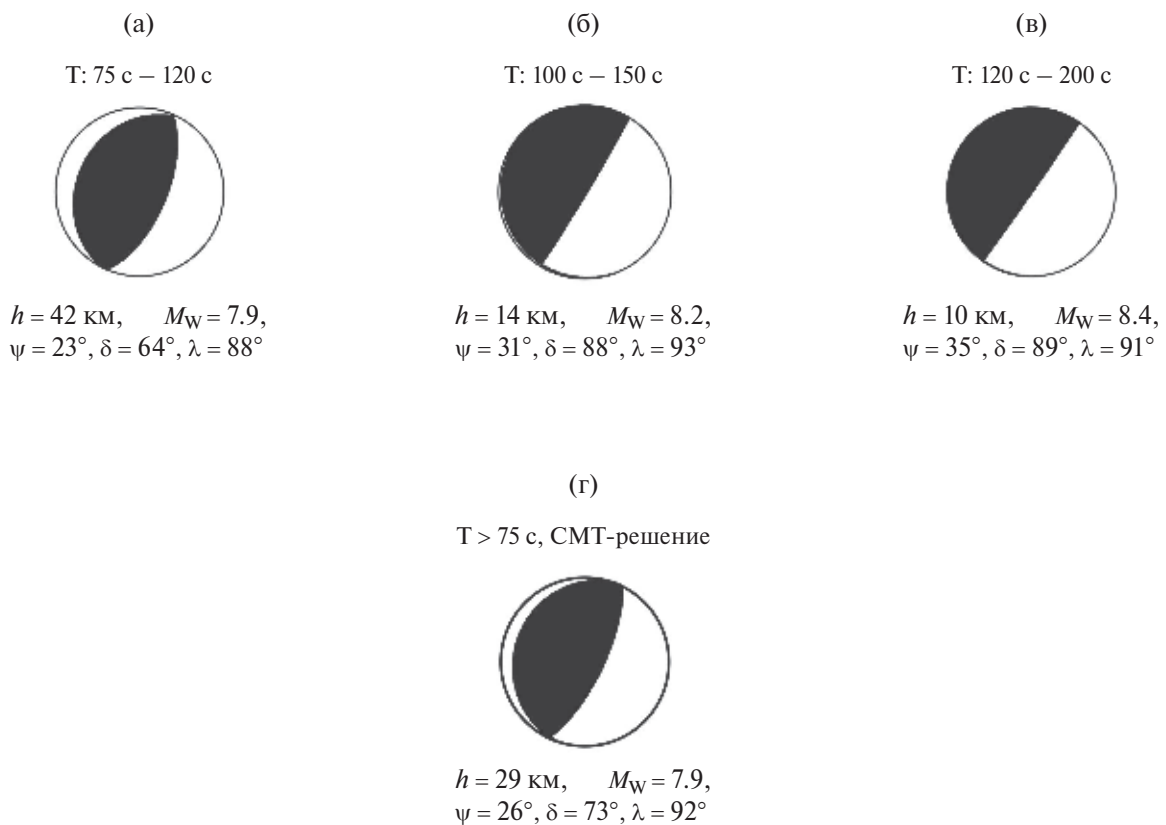


Рис. 5. Результаты инверсии спектров поверхностных волн в трех спектральных диапазонах. Сравнение с ГСМТ-решением.

предполагать, что существенные отличия нашего решения от ГСМТ-решения объясняются неадекватным выбором спектрального диапазона наблюдений при расчете последнего.

ВЫВОДЫ

Определение фокального механизма и глубины очага землетрясения прямым перебором их возможных значений на сетке в параметрическом пространстве в случае достаточно высокой детальности перебора требует значительных затрат компьютерного времени. В качестве примера источника, требующего использования детальной сетки, рассматривается частный случай мелкофокусного землетрясения, одна из нодальных плоскостей которого субгоризонтальна. Таким событием является сильнейший афтершок землетрясения в Тохоку, детально рассмотренный в работе. Полученные для него результаты существенно отличаются от решения из Глобального СМТ-каталога. Показано, что это может быть объяснено неадекватным выбором спектрального диапазона наблюдений при получении СМТ-решения. В работе обсуждается применение параллельных вычислений для ускорения расчета параметров землетрясения. Одним из наиболее популярных средств параллельного программирования для компьютеров с общей памятью в настоящее время является технология OpenMP. В работе представлены результаты использования этого метода для изучения сильнейшего афтершока землетрясения в Тохоку.

Авторы благодарят глобальные сейсмические сети IRIS, GEOSCOPE и GEOFON за предоставление сейсмических записей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антонов А.С.* Параллельное программирование с использованием технологии OpenMP: Учебное пособие. М.: изд-во МГУ. 2009. 77 с.
- Бабич В.М., Чихачев Б.А., Яновская Т.Б.* Поверхностные волны в вертикально-неоднородном упругом пространстве со слабой горизонтальной неоднородностью // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1976. № 4. С. 24–31.
- Букчин Б.Г., Левшин А.Л., Ратникова Л.И., Дост Б., Нолет Г.* Оценка пространственно-временных характеристик очага Спитакского землетрясения по широкополосным записям поверхностных волн. Проблемы прогноза землетрясений и интерпретация сейсмических данных. М.: Наука. Вычислительная сейсмология. Вып. 25. 1992. С. 238–250.
- Букчин Б.Г.* Особенности излучения поверхностных волн мелкофокусным источником // Физика Земли. 2006. № 8. С. 88–93.
- Букчин Б.Г., Фомочкина А.С., Панца Ж.Ф.* Определение параметров очагов землетрясений с высоким разрешением. «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Десятой Международной сейсмологической школы». Обнинск: ГС РАН. 2015. С. 49–53.
- Backus G., Mulcahy M.* Moment tensors and other phenomenological descriptions of seismic sources. Pt.1. Continuous displacements // Geophys.J. R. astr. Soc. 1976. V. 46. P. 341–362.
- Bukchin B., Clévéde E., Mostinskiy A.* Uncertainty of moment tensor determination from surface wave analysis in case of shallow earthquake // Journal of Seismology. 2010. V. 14. № 3. P. 601–614.
- Lasserre C., Bukchin B., Bernard P., Tapponnier P., Gaudemier Y., Mostinsky A., Rong Dailu.* Source parameters and tectonic origin of the June 1 st, 1996 Tianzhu ($M_w = 5.2$) and July 21 st, 1995 Yongden ($M_w = 5.6$) earthquakes, near Haiyuan fault (Gansu, China) // Geophysical Journal International. 2001. V. 144 P. 206–220.
- Woodhouse J.H.* Surface waves in the laterally varying structure // Geophys. J. R. 1974. Astr. Soc. V. 90. № 12. P. 713–728.

The Use of Parallel Computing for the High-Resolution Determination of Earthquake Source Parameters

A. S. Fomochkina^{a,*} and B. G. Bukchin^a

^a*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics,
Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia*

**E-mail: nastja_f@bk.ru*

Received June 29, 2017

Alongside the determination of the focal mechanism and source depth of an earthquake by direct examination of their probable values on a grid in the parameter space, also the resolution of these determinations can be estimated. However, this approach requires considerable time in the case of a detailed search. A special case of a shallow earthquake whose one nodal plane is subhorizontal is an example of the sources that require the use of a detailed grid. For studying these events based on the records of the long-period surface waves, the grids with high degree of detail in the angles of the focal mechanism are required. We discuss the application of the methods of parallel computing for speeding up the calculations of earthquake parameters and present the results of studying the strongest aftershock of the Tohoku, Japan, earthquake by this approach.

Keywords: focal mechanism, shallow earthquake, parallel calculations