

V. СОВРЕМЕННЫЙ ВУЛКАНИЗМ И ПРИРОДНЫЕ КАТАСТРОФЫ: ПРОГНОЗ ЦУНАМИ, ВУЛКАНИЧЕСКОЙ И СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМОГРАММ ОТ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ДАЛЬНОГО ВОСТОКА РОССИИ НА УДАЛЕНИЯХ ДО 3000 КИЛОМЕТРОВ

И.Р. Абубакиров, В.М. Павлов

Камчатский филиал Учреждения Российской академии наук Геофизической службы РАН
(КФ ГС РАН), e-mail: air@emsd.ru

В настоящее время в мире наметилась отчетливая тенденция замены магнитуды, как характеристики очагов землетрясений, на тензор сейсмического момента (ТСМ). На основании ТСМ определяется, так называемая, моментная магнитуда, которая в последние годы стала в мировой практике основной и стандартной характеристикой мощности очага землетрясения. Тип ТСМ, отражающий механизм землетрясения, может прояснить вопрос о цунамигенности землетрясения.

В последние годы в России активно развивается сеть широкополосных станций, включая Дальний Восток, где такие станции предполагается использовать в системе предупреждения о цунами. Это позволяет переходить к задаче определения ТСМ для территории Дальнего Востока России и других ее сейсмически опасных регионов. Тем самым встает задача разработки методики для решения этой проблемы.

Для постановки такой (обратной) задачи необходимо уметь решать прямую задачу расчета полных широкополосных теоретических сейсмограмм на региональных расстояниях от протяженного источника с произвольным ТСМ. К настоящему времени в КФ ГС РАН разработана методика расчета синтетических сейсмограмм от точечного источника в слоисто-однородной среде [Pavlov, 2002, Павлов, 2006], которая может стать основой разработки методики расчета ТСМ.

Цель данной работы – (1) определить диапазон периодов, в котором синтетические сейсмограммы от точечного источника в слоисто-однородной среде адекватно приближают реальные сейсмограммы от сильных землетрясений Дальнего Востока России на региональных расстояниях;

(2) продемонстрировать возможности программы расчета синтетических сейсмограмм в плане охвата эпицентральных расстояний и способности воспроизведения волновых форм и амплитуд реальных сейсмограмм от сильных землетрясений Дальнего Востока России.

Используемый в работе алгоритм расчета синтетических сейсмограмм [Pavlov, 2002, Павлов, 2006] в принципиальном отношении близок к алгоритму, изложенному в работе [Фатьянов, 1990], но содержит новые элементы, существенно упрощающие его логическую структуру и повышающие эффективность. Основным новым элементом является введение матричного импеданса – матричной функции, преобразующей вектор движения в вектор напряжения. Алгоритм максимально нацелен на получение точных полных синтетических сейсмограмм в широкой полосе частот, включающей, с одной стороны, нулевую частоту (статическое смещение), а с другой стороны достаточно большие частоты, представляющие интерес. Алгоритм не имеет ограничений на число и мощность слоев и включаемую в расчет частоту.

Алгоритм реализован в виде компьютерной программы, позволяющей рассчитывать синтетические сейсмограммы от точечного источника с произвольным ТСМ. Программа тестировалась сравнением с аналитическим решением, а также с результатами расчетов, проведенных другими авторами. Результаты тестирования показали, что программа позволяет рассчитывать полные теоретические сейсмограммы, как для близких расстояний, так и для расстояний порядка 3 тысяч километров и может быть использована для моделирования сейсмограмм от реальных землетрясений Дальнего Востока России на сейсмических станциях региона.

Для опробования возможностей программы выбраны 5 сильнейших землетрясений Дальнего Востока России за последние 15 лет: Шикотанское 4.11.1994 г. ($M_w=8.3$), Кроноцкое

5.12.1997 г. ($M_w=7.8$), Олюторское 20.04.2006 г., ($M_w=7.6$), Симуширское 15.11.2006 г., ($M_w=8.3$) и Симуширское землетрясение 13.01.2007 г., ($M_w=8.1$). Использовались широкополосные записи этих землетрясений, записанные сейсмическими станциями региона в диапазоне эпицентральных расстояний от 800 до 2600 километров. Для каждого землетрясения использовали записи трех станций. На рис. 1 показаны эпицентры землетрясений, их механизмы и положение цифровых широкополосных станций, записи которых использовались в работе.

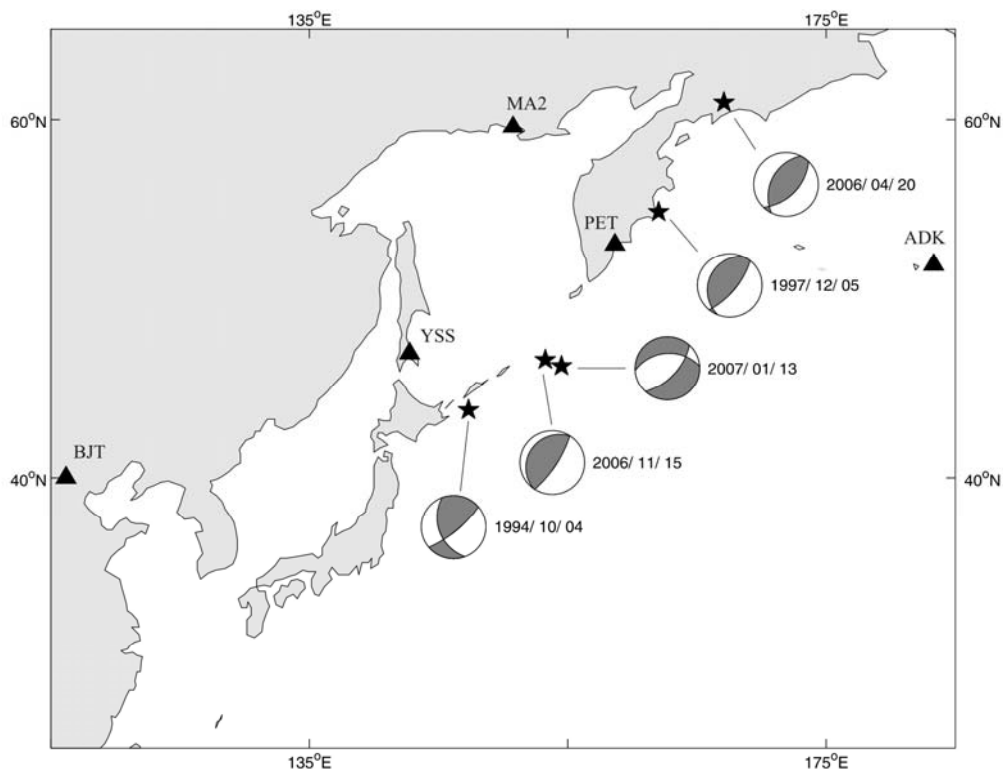


Рис. 1. Карта с эпицентрами использованных землетрясений и сейсмическими станциями. Для каждого из использованных землетрясений приведены СМТ механизмы в стереографической проекции нижней полусферы.

Для расчета синтетических сейсмограмм от протяженного очага сильного землетрясения использовали следующий подход: модельный очаг принимали точечным, а эффекты протяженности учитывали через временную функции очага. Синтетические сейсмограммы от точечного источника с ТСМ по данным каталога СМТ (<http://www.globalcmt.org>) рассчитывались с шагом по времени в 1 секунду для модели среды, предложенной для Камчатки [Кузин, 1974]. Чтобы учесть эффекты, связанные с протяженностью очага, сейсмограммы от точечного источника, рассчитанные для определенной сейсмической станции, свертывались с временной функцией очага, излученной очагом в направлении этой станции. Такая функция часто называется «кажущейся временной функцией источника» (КВФИ). Вообще говоря, для разных волновых групп и разных станций, КВФИ отличаются как по форме, так и по длительности. Однако в данной работе использовали упрощенный подход, при котором принимали форму КВФИ неизменной и варьировали лишь ее длительность. Значение длительности КВФИ подбирали для конкретной станции и волновой группы на основе степени согласия при сравнении наблюдаемых и синтетических сейсмограмм. Степень согласия наблюдаемых и синтетических сейсмограмм оценивали визуально. Расчет базовой формы временных функций произведен А.А. Гусевым с помощью пакета ACCSYN [Gusev A.A., Pavlov V.M., 2006] для модели протяженного очага, представленного в виде набора точечных источников (субисточников), каждый из которых характеризуется определенной временной функцией (скоростью подвижки). Субисточники «включаются» с приходом фронта разрыва. Форма базовой временной функции протяженного очага определяется как сумма временных функций точечных субисточников.

Принятая модель среды изначально была предназначена для Камчатки. Однако, для низких частот (больших периодов) она в определенной степени согласована со средней

моделью для Земли в целом. Для того чтобы выяснить диапазон периодов, для которого принята модель адекватна, были сопоставлены результаты полосовой фильтрации расчетных и наблюдаемых записей смещений грунта от Симуширского землетрясения 2007 г. на станциях «Южно-Сахалинск» (YSS), «Магадан» (MA2) и «Петропавловск» (PET). Сопоставление проводилось на 3 компонентах: Z, EW, NS. Длительность КВФИ на данном этапе расчетов принималась постоянной для всех волновых групп и станций. Фильтрация выполнялась для двух наборов полос периодов: (1) 150-60 с, 150-30 с, 150-15 с, 150-7.5 с, 150-3.75 с; (2) 120-60 с, 60-30 с, 30-15 с, 15-7.5 с, 7.5-3.75 с. Проведенное сопоставление показало, что наилучшее согласие наблюдается в полосе периодов $T=150-60$ с. Поэтому дальнейшие расчеты проводились в этой полосе периодов для всех использованных землетрясений.

Сравнение в полосе периодов $T=150-60$ секунд проводилось на пяти компонентах: Z, EW, NS, радиальной и трансверсальной. Длительность КВФИ для фиксированного землетрясения варьировали от станции. При этом для всех компонент и волновых групп на конкретной станции длительность КВФИ принимали постоянной, а значение длительности подбиралось, так, чтобы обеспечить наилучшее согласие в группах продольных или поперечных и поверхностных волн. Проведенные численные эксперименты показали, что отдельные части реальных сейсмограмм от протяженного очага можно успешно подогнать с помощью теоретических сейсмограмм от точечного источника, осуществляя учет протяженности очага варьированием длительности КВФИ на отдельных станциях. При осреднении по трем станциям различие в величине максимальных амплитуд наблюдаемых и расчетных сейсмограмм для отдельных землетрясений, как правило, не превышает 20%. Исключение составляет Олюторское землетрясение 20.04.2006 г. Для этого землетрясения расхождение доходит до 40%. Кроме того, расхождение около 50% наблюдается для Симуширского землетрясения 13.01.2007 г. на трансверсальной компоненте станций PET и YSS. На рис. 2, 3 показаны наблюдаемые и расчетные сейсмограммы для двух землетрясений: Кроноцкого (5.12.1997 г.) и Симуширского (13.01.2007 г.).

Проведенные на заключительном этапе расчеты показали, что степень согласия наблюдаемых и расчетных сейсмограмм можно улучшить, допустив разные длительности КВФИ для разных волновых групп.

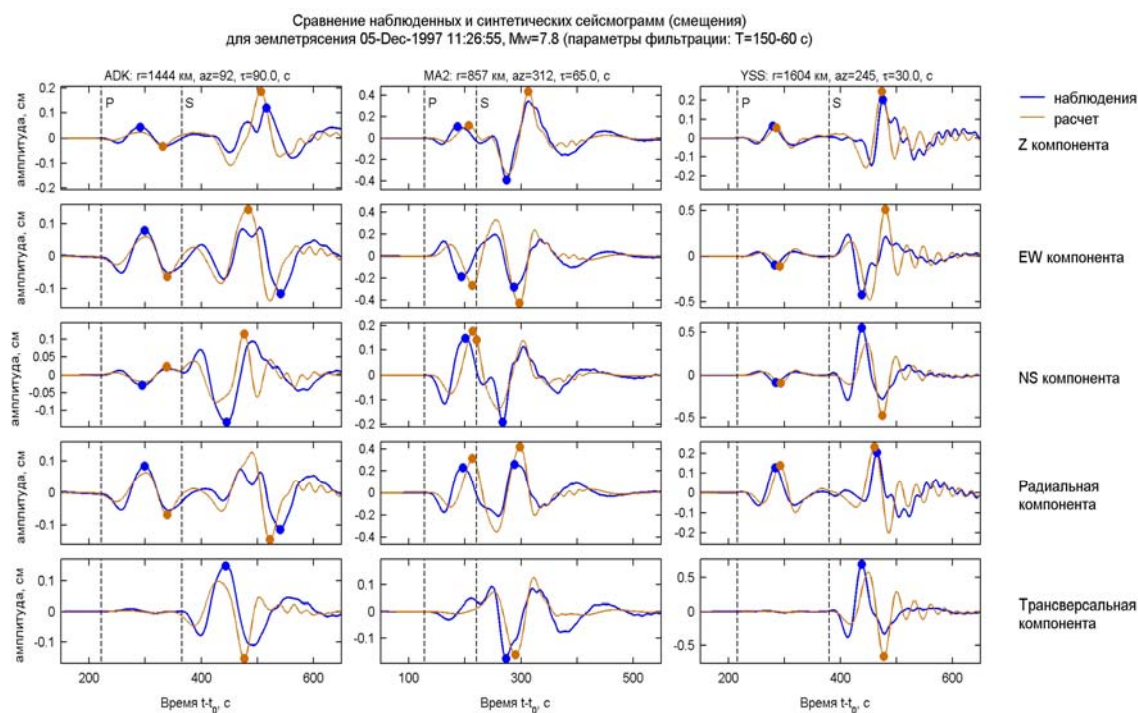


Рис. 2. Наблюдаемые и расчетные сейсмограммы смещения для Кроноцкого землетрясения 1997 г. в полосе периодов 60-150 с на станциях ADK, MA2 и PET. Вертикальные линии – времена вступлений P- и S- волн. Кружками отмечено положение максимумов в группе P-волн и в группе (S + поверхностные волны). Для каждой из 3 станций приведены значения эпицентрального расстояния r , азимута az из эпицентра на станцию и длительности τ кажущейся временной функции очага. Ноль шкалы времени соответствует времени в очаге землетрясения.

Сравнение наблюдаемых и синтетических сейсмограмм (смещения)
для землетрясения 13-Янв-2007 04:23:21, Mw=8.1 (параметры фильтрации: T=150-60 с)

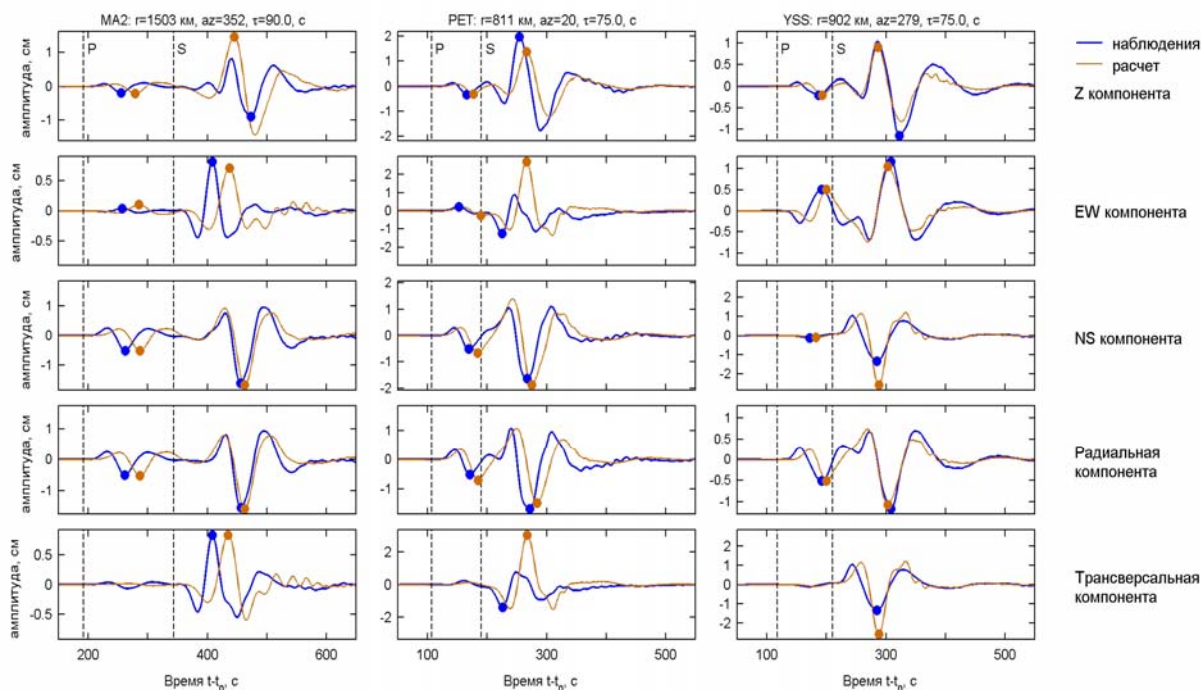


Рис. 3. Наблюдаемые и расчетные сейсмограммы смещения для Симуширского землетрясения 2007 г. в полосе периодов 60-150 с на станциях MA2, PET, YSS. Обозначения те же, что и на рис. 2.

Выводы:

1. Разработанный в КФ ГС РАН алгоритм расчета синтетических сейсмограмм от точечного источника в слоисто-однородной среде позволяет моделировать длиннопериодные сейсмограммы от сильных землетрясений Дальнего Востока России на удалениях до 3000 км.
2. Проведенные численные эксперименты показывают, что в полосе периодов 60-150 секунд отдельные сегменты реальных сейсмограмм от протяженного очага можно подогнать с помощью теоретических сейсмограмм от точечного источника с подходящей кажущейся временной функцией очага. Наилучшее согласие наблюдаемых и расчетных сейсмограмм достигается при независимых значениях длительности кажущихся временных функций для разных станций и волновых групп.
3. Возможность подгонки такого рода создает предпосылки для разработки методики определения ТСМ сильных землетрясений по широкополосным записям на станциях с удалением до 3000 км с использованием синтетических сейсмограмм от точечного источника в слоистой среде.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант № 07-05-00775.

Список литературы

- Pavlov V.M.** A convenient technique for calculating synthetic seismograms in a layered half-space // Proceedings of the Intern. Conf. "Problems of Geocosmos" / St. Petersburg: 2002. P. 320-323.
- Кузин И.П.** Фокальная зона и строение верхней мантии в районе Восточной Камчатки. Москва: Наука, 1974. 132 с.
- Павлов В.М.** Расчет статических смещений от силы в слоистом полупространстве // Вулканология и сейсмология. 2006. № 4. С. 25-33.
- Фатьянов А.Г.** Полуаналитический метод решения прямых динамических задач в слоистых средах // Доклады АН СССР, 1990. Т. 310. № 2. С. 323-327.
- Gusev A.A., Pavlov V.M.** Wideband simulation of earthquake ground motion by a spectrum-matching, multiple-pulse technique // Trieste, Int. Centre Theor. Phys., Preprint IC2006023, 27 pp. 2006.