

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СВАН-ДИАГРАММ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С ЭПИЦЕНТРАМИ НА АКВАТОРИИ ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ МОРЕЙ

Фокина Т.А.¹, Лихачева О.Н.¹, Шевченко Г.В.²

¹Сахалинский филиал Геофизической службы РАН, г. Южно-Сахалинск, fokina@seismo.sakhalin.ru

²Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия

Введение

Использование цифровой регистрирующей аппаратуры в практике сейсмологических наблюдений позволяет в полной мере применять для анализа записей волновых форм землетрясений методы спектрально-временного анализа (СВАН) [1]. Это дает возможность исследовать частотный состав сейсмических волн и сопоставить его с параметрами землетрясений, с целью выявить частотные особенности записей событий, имеющих катастрофические последствия.

Один из практически важных вопросов – оценка цунамигенности землетрясений, происходящих на акваториях Мирового океана и предупреждение населения прибрежных районов о возможных цунами. Как показывает практика, магнитудно-географический критерий, заложенный в действующий Регламент Службы предупреждения о цунами (СПЦ), не является достаточным, что нередко приводит к выпуску ложных тревог цунами [4]. Опыт показывает, что цунамигенность землетрясения зависит от глубины гипоцентра, и что глубокие землетрясения, как правило, не вызывают значительных цунами. Оценка, хотя бы грубая, глубины очага по виду волновой формы на мониторе дежурного сейсмолога и СВАН-диаграммы регистрируемого землетрясения могла бы дать возможность уменьшить число ложных тревог.

Первые результаты применения методов спектрально-временного анализа для записей сильных землетрясений на акваториях Дальнего Востока являются обнадеживающими [6]. Выявлены следующие особенности частотного состава сейсмических сигналов сильных землетрясений с эпицентрами в районах Курильских островов, Камчатки и Японии:

1. На записях мелкофокусных землетрясений через несколько секунд после вступления Р-волны вступают длиннопериодные ($T \geq 10$ с), так называемые, просачивающиеся моды, или PL-волны [8], амплитуда которых уменьшается с увеличением глубины гипоцентра, что позволяет быстро выделить глубокофокусные ($h \geq 300$ км) землетрясения.

2. На примере Симуширских землетрясений 2006 и 2007 гг. и землетрясения на о. Хоккайдо 1993 г. подтвержден отмеченный в работе [7] эффект отсутствия высоких частот (0.33–16.52 Гц) в записях землетрясений, вызвавших особенно высокую волну цунами.

Исходные материалы и методы

Анализировались записи 139 землетрясений за период с 1990 г. (когда появились широкополосные сейсмограммы IRIS) по 2013 г. с магнитудой не менее 6.6 и с эпицентрами в треугольнике, ограниченном с юга 30° с.ш., с запада – 130° в.д., с востока – 160° з.д. Самое «северное» землетрясение оказалось на широте 67.61° с.ш. Из этого набора 114 землетрясений произошли на глубине менее 70 км, 25 – от 70 до 632 км.

СВАН-диаграммы [1] строились для вертикальной составляющей сейсмограмм, записанных широкополосной аппаратурой IRIS-2 на сейсмической станции «Южно-Сахалинск». Амплитуды вертикальной компоненты скорости на всех сейсмограммах, представленных в данной работе, нормированы на максимальное значение полного трехкомпонентного вектора скорости в каждой записи.

Зависимость частотного состава сейсмограммы на участке между вступлениями волн Р и S от глубины гипоцентра землетрясения

По внешнему виду записи отличить глубокофокусное землетрясение от мелкофокусного не сложно, когда оно полностью прописалось на сейсмограмме. На рисунке 1 представлена сейсмограмма мелкофокусного ($h = 10$ км, $M_w = 8.3$) землетрясения, на рисунке 2 – глубокофокусного ($h = 602$ км, $M_w = 8.2$). Мелкофокусное характеризуется значительно большими периодами сейсмических волн, а также большими амплитудами поверхностных волн, которые резко уменьшаются с увеличением глубины гипоцентра землетрясения. Если для записи поверхностных

волн нужно время, то разница в периодах видна с первого вступления. Используя СВАН-диаграмму, можно оценить глубину землетрясения в то время, когда на мониторе только пишется Р-волна.

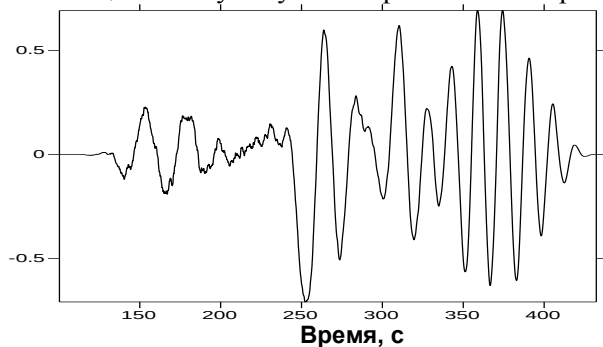


Рис. 1. Симуширское землетрясение
15.11.2006 г., $H = 10$ км, $M_w = 8.3$

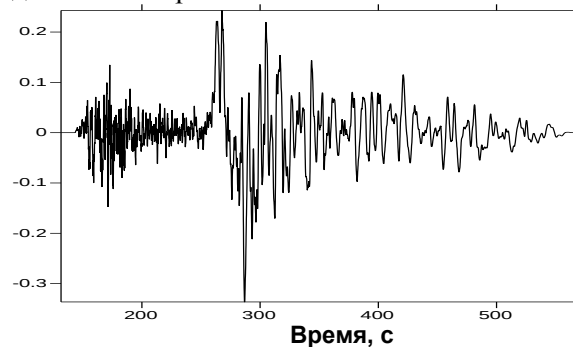


Рис. 2. Землетрясение в Охотском море
24.05.2013 г., $H = 602$ км, $M_w = 8.2$

Если посмотреть на участок сейсмограммы между вступлениями Р и S волн (рис. 3, 4), то для всех мелкофокусных землетрясений Курило-Охотского региона обязательно присутствие длиннопериодных волн. Это PL-волновой цуг с нормальной дисперсией, с периодом выше 10 с, начинающийся вблизи вступления волны Р и иногда продолжающийся, по крайней мере, до времени начала цуга волн Рэлея [8]. PL-фаза обычно наблюдается на расстояниях меньше 25° при мелкофокусных толчках. Движение частиц поверхности эллиплично и направлено вперед, а амплитуды не больше, чем четверть амплитуды Рэлеевской волны при таком же периоде. Сравнение дисперсии PL и Рэлеевской волн показывает, что обе волны распространяются примерно в одном и том же приповерхностном волноводе. В то время как Рэлеевские волны соответствуют нормальному режиму распространения, PL-волны возникают в соответствии с режимом утечки в этом же волноводе [8]. Учитывая характер движения частиц в этих волнах, мы рассматриваем вертикальные компоненты сейсмограмм, т.к. на них волны такого типа прописываются лучше всего.

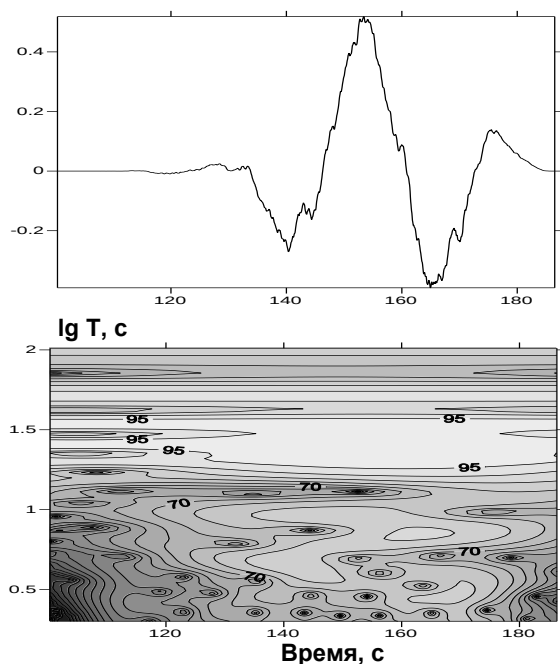


Рис. 3. Запись Р-волн и СВАН-диаграмма
Симуширского землетрясения 15.11.2006 г.

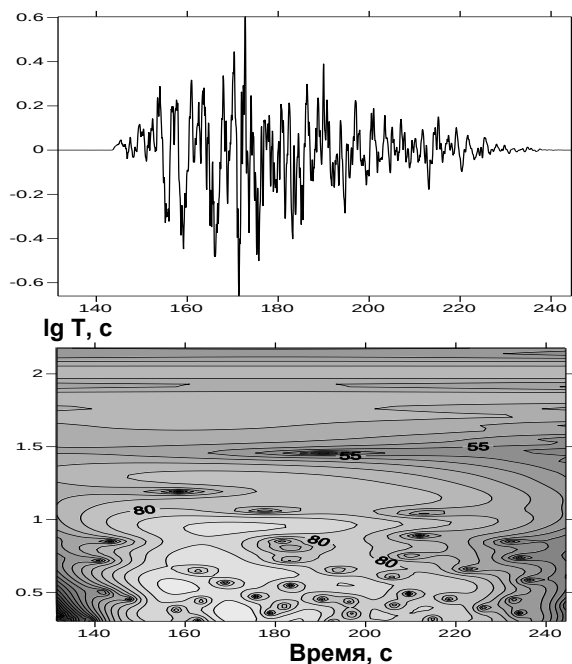


Рис. 4. Запись Р-волн и СВАН-диаграмма
землетрясения в Охотском море 24.05.2013 г.

Волны PL характеризуют среду, в которой они распространяются, поэтому по их наличию и, может быть, интенсивности, можно выделить потенциально цунамиопасные мелкофокусные землетрясения. Это хорошо видно на СВАН-диаграмме (рис. 3), где PL-волнам соответствуют светлые полосы на периодах 20 с, 25–27 с, 33–36 с, 46–59 с. Для глубокофокусного землетрясения все заметные периоды не превышают 10 с (рис. 4). К сожалению, на черно-белой СВАН-диаграмме максимумы и минимумы интенсивности видны не столь хорошо, как на цветной, но, тем не менее, разница между рисунками 3 и 4 видна отчетливо.

Интересно было бы проследить, как запись волн PL меняется в зависимости от глубины очага землетрясения, и при какой глубине гипоцентра эти волны перестают наблюдаться в записях сейсмического сигнала. Также, важно изучить характер проявления этих волн, в зависимости от района, в котором произошло землетрясение (Курильские острова, Охотское море, Камчатка, Японское море, о. Хоккайдо, о. Хонсю, материк).

Анализ отобранных записей показал, что при глубине гипоцентра, равной 102 км, на сейсмограмме присутствуют довольно интенсивные PL-волны, при глубине свыше 300 км они отсутствуют. При глубине в 175 и 189 км они еще есть, но их интенсивность намного ниже, а землетрясений с глубиной гипоцентра от 189 до 303 км в нашем наборе не оказалось. В дальнейшем можно проанализировать более слабые землетрясения на этой глубине.

Что касается зависимости от района, где произошло землетрясение, то PL-волны четко выражены для сильных мелкофокусных землетрясений Курило-Камчатской фокальной зоны, для Сахалина, для района о. Хоккайдо и о. Хонсю, хотя для землетрясений последнего района характерны меньшие периоды этих волн.

Связь частотного состава записи землетрясения и высоты волны цунами

В работе [7], посвященной применению вейвлет-анализа для оценки цунамигенности землетрясений, авторы обратили внимание на отсутствие высоких частот (0.33–16.52 Гц) на сейсмограммах цунамигенных землетрясений. Мы проверили существование этого эффекта на примере Симуширских землетрясений 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г. Это два сильных события с близкими значениями координат эпицентра, глубины и магнитуды, при этом, первое вызвало весьма сильное цунами (на безлюдных островах центральной части Курильской гряды высоты волн достигали 15 – 20 м), а второе – весьма умеренное [2, 3].

На сейсмограммах и СВАН-диаграммах этих землетрясений видно отсутствие короткопериодных колебаний (с периодом менее 3 с) для первого землетрясения (рис. 3), и наличие их для второго (рис. 5).

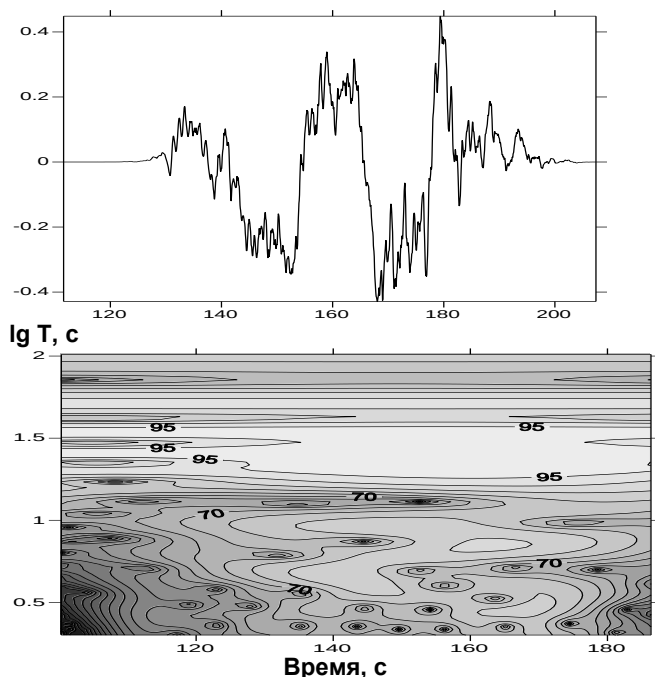


Рис. 5. Запись Р-волн и СВАН-диаграмма Симуширского землетрясения 13.01.2007 г., $h = 10$ км, $M_w = 7.9$

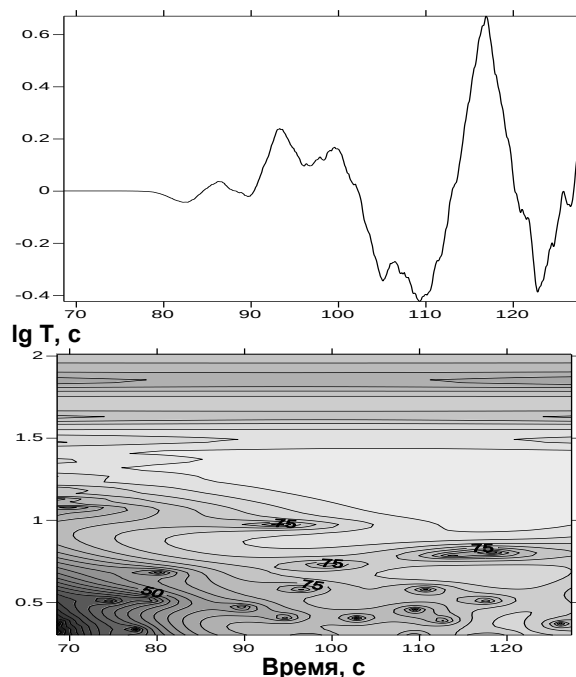


Рис. 6. Запись Р-волн и СВАН-диаграмма землетрясения 12.07.1993 г. в Японском море, $h = 16.7$ км, $M_w = 7.7$

На рисунке 6 представлены сейсмограмма и СВАН-диаграмма землетрясения на Хоккайдо 12.07.1993 г. ($h = 16.7$ км, $M_w = 7.7$), которое вызвало очень сильное цунами: вдоль юго-западного побережья о. Окушири – 30.6 м; на западном побережье о. Хоккайдо – 10 м. И здесь опять практически отсутствуют высокие частоты.

Из группы событий, вызвавших большие волны цунами, несколько выпадает землетрясение Тохоку 11.03.2011 г., в спектре которого присутствуют и короткопериодные и длиннопериодные составляющие, но это землетрясение другого масштаба, и, возможно, требует иного подхода.

Заключение

Сравнительный анализ СВАН-диаграмм сильных землетрясений Курило-Охотского региона, Камчатки и Японских островов позволил сделать следующие выводы.

1. Отсутствие или малая интенсивность длиннопериодных ($T > 10$ с) волн на интервале записи сейсмического сигнала между вступлениями волн Р и S, что особенно хорошо проявляется на СВАН-диаграмме, свидетельствует о значительной глубине гипоцентра землетрясения ($h \geq 180$ км), и, соответственно, о чрезвычайно малой вероятности заметной волны цунами.

2. Отсутствие или малая интенсивность короткопериодных ($T < 3$ с) волн на интервале записи сейсмического сигнала между вступлениями волн Р и S, что особенно хорошо проявляется на СВАН-диаграмме, свидетельствует о вероятности возникновения аномально высоких волн цунами.

Таким образом, полученные результаты могут дать дополнительные основания для решения вопроса о цунамигенности регистрируемого землетрясения и объявления или не объявления тревоги цунами. В целом это может повысить эффективность службы предупреждения о цунами.

В настоящее время продолжают исследования записей сильных землетрясений в Дальневосточном регионе, с целью выявления соответствий между параметрами сейсмических событий и частотными характеристиками регистрируемых сейсмических сигналов. Одной из задач является быстрая оценка магнитуды землетрясения по интенсивности PL-волн.

Список литературы

1. Ландер А.В., Левшин А.Л., Писаренко В.Ф., Погребинский Г.А. О спектрально-временном анализе колебаний // Вычислительные и статистические методы интерпретации сейсмологических данных. Вычислительная сейсмология; вып. 6. М.:Наука, 1973. С. 3–27
2. Левин Б.В., Кайстренко В.М., Рыбин А.В. и др. Проявления цунами 15.11.2006 г. на Центральных Курильских островах и результаты моделирования высот заплесков // ДАН. 2008. Т. 419, № 1. С. 118–122.
3. Лобковский Л.И., Рабинович А.Б., Куликов Е.А. и др. Курильские землетрясения и цунами 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. (наблюдения, анализ и численное моделирование) // Океанология. 2009. Т. 49, № 2. С. 166–181.
4. Поплавский А. А., Храмушин В. Н., Непоп К. И., Королев Ю. П. Оперативный прогноз цунами на морских берегах Дальнего Востока России. Южно-Сахалинск, 1997. 273 с.
5. Старовойт О.Е., Коломиец М.В., Рыжикова М.И. Анализ макросейсмических данных глубокого землетрясения 24 мая 2013 г. в Охотском море // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Восьмой Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 10–16.
6. Фокина Т.А., Лихачева О.Н., Шевченко Г.В. Сравнительный анализ СВАН-диаграмм для оценки цунамигенности землетрясений // Сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска», 26-30 мая 2015, г. Южно-Сахалинск: Владивосток, Дальнаука, 2015. С. 213–217.
7. Chamoli A., Swaroop Rani V., Srivastava K., Srinagesh D., and Dimri V. P. Wavelet analysis of the seismograms for tsunami warning //Nonlinear Processes in Geophysics. 2010. V. 17. P. 569–574.
8. Oliver J., Major M. Leaking modes and the PL phase // BSSA. 1960. V. 50. P. 165–180.