

СОПОСТАВЛЕНИЕ ВОЛНОВЫХ ФОРМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ТОХОКУ, ПОЛУЧЕННЫХ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИМ И ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ МЕТОДАМИ

Пулатенко В. В.

*ФГБУН Институт тектоники и геофизики им. Ю.А.Косыгина ДВО РАН, г. Хабаровск,
pvv2.dv@gmail.com*

Введение

Развитие IGS и появление высокоточных орбит в точно определенной земной системе координат открыло новые способы использования системы GPS. GPS-сейсмология – одно из новых приложений GPS. В ее основе – отсутствие влияния сейсмических процессов на положение спутников. GPS приемник с высокой частотой записи может использоваться как сейсмометр, регистрирующий изменение положения антенны.

Проведенные стендовые эксперименты показали принципиальную возможность получения записей смещений и очень хорошую согласованность их с интегрированными записями велосиметров и акселерометров [1]. Были получены GPS записи различных землетрясений, в том числе сопоставленные с записями близко расположенных сейсмометров [2, 3].

В настоящее время системы спутниковой навигации широко используются для определения сейсмического момента и смещений [4]. С помощью GPS можно определять смещения большой величины на любом удалении от эпицентра. В то же время велосиметры широкополосных сейсмостанций перегружаются при сильном сигнале и не подходят для определения смещений большой величины, а акселерометры требуют двойного интегрирования записей, искажающего значения смещений.

Сеть геодезических и сейсмологических наблюдений ДВО РАН

В рамках выполнения целевой комплексной программы научных исследований ДВО РАН «Современная геодинамика, активные геоструктуры и природные опасности Дальнего Востока России» (2009 – 2013 гг.) была организована сеть геодезических и сейсмологических наблюдений ДВО РАН, включающая, в т.ч. сейсмостанции, совмещенные с GPS приемниками. Пункты наблюдений оснащены базовыми станциями GPS/ГЛОНАСС Trimble NetR5, а также широкополосными сейсмометрами REF TEK 151-120 с цифровыми регистраторами REF TEK 130-01 или широкополосными сейсмометрами STS-2 с цифровыми регистраторами Datamark LS-7000XT.

Помимо решения задач геодинамики и уплотнения сейсмической сети на Дальнем Востоке, сеть наблюдений ДВО РАН может использоваться в GPS-сейсмологии.

Основная задача данной работы – сопоставить в разных частотных диапазонах волновые формы землетрясения Тохоку ($M_w=9.1$, 11.03.2011, Япония), полученные сейсмологическим и геодезическим методами на трех пунктах наблюдений: Ванино (REF TEK 151-120, 49.091°N, 140.255°E), Хабаровск (STS-2, 48.473°N, 135.051°E) и Горнотаёжное (STS-2, 43.698°N, 132.166°E).

Методика обработки данных

Обработанные записи GPS приемника представляют собой смещения фазового центра антенны по трем координатам относительного первоначального положения. Сейсмические данные представляют собой скорости, поэтому они были преобразованы в смещения удалением постоянной составляющей и интегрированием. Полученные записи смещений имеют различные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ). У GPS записей АЧХ ограничена только сверху из-за дискретизации значением 0.5 Гц. У сейсмометров REF TEK 151-120 и STS-2 АЧХ идентичны в диапазоне от 1 Гц и ниже (рис.1) и состоят из полосы пропускания (более 0.01 Гц) и частотного диапазона вне полосы пропускания (менее 0.01 Гц).

Таким образом, необходимо было применить частотную фильтрацию для получения записей с одинаковыми АЧХ. Граничные частоты фильтров следовало подобрать исходя из частотного спектра землетрясения, поскольку запись GPS содержит большое количество шума на всех частотах. На рис. 2 приведены спектры мощности GPS и сейсмической записей, на основе которых верхняя граница частотного диапазона была выбрана равной 0.1 Гц.

В качестве нижних границ были взяты значения 0.002 Гц, 0.004 Гц и 0.01 Гц. Таким образом, получились 3 частотных диапазона: первый – от 0.01 до 0.1 Гц; второй – от 0.004 до 0.1 Гц; третий – от 0.002 до 0.1 Гц. Для получения остальных диапазонов к сейсмической записи применялся фильтр

с АЧХ, обратной АЧХ сейсмометров. Несмотря на большое расстояние от эпицентра (около 1200 км), записи сейсмометра REF TEK 151-120 содержат перегруз горизонтальных каналов. Тем не менее, эти записи были использованы после приблизительного восстановления отсутствующего сигнала вручную. Сейсмометры STS-2 имеют меньшую чувствительность и их записи перегруза не содержат.

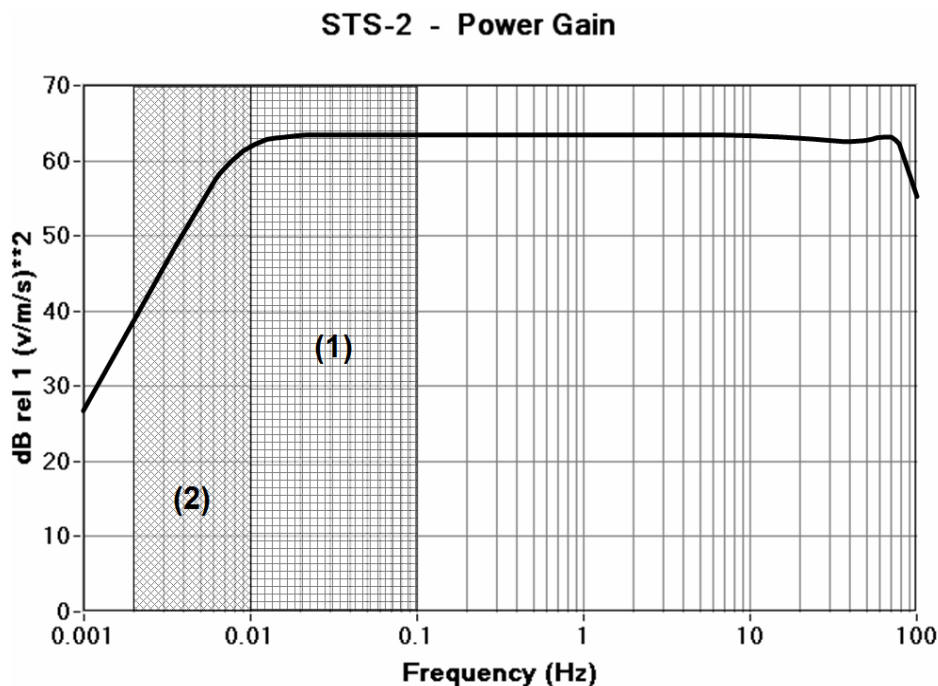


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика сейсмометра STS-2. (1) – частотный диапазон 0.01 – 0.1 Гц, одинаково регистрируемый сейсмометрами и GPS приемником; (2) – частотный диапазон 0.002 – 0.01 Гц, регистрируемый сейсмометрами и GPS приемником неодинаково.

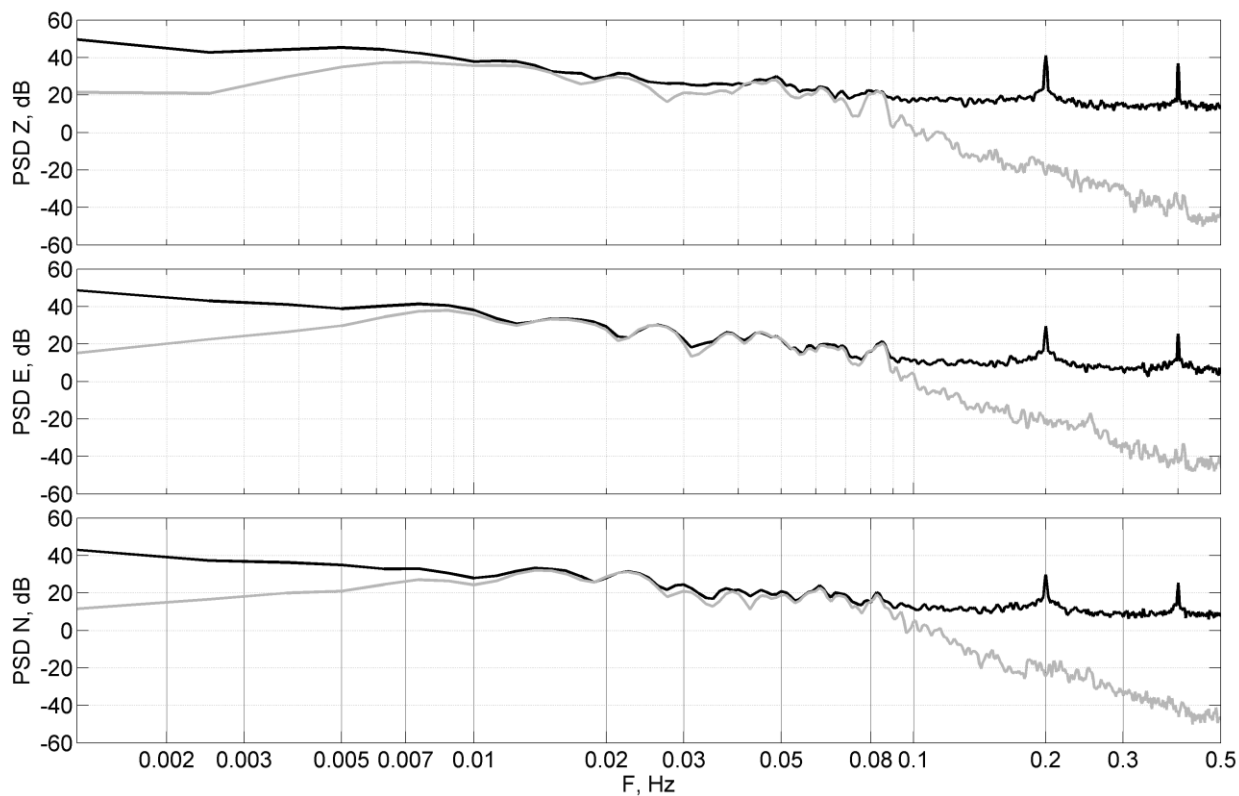


Рис. 2. Спектры мощности GPS записи (черные линии) и сейсмической записи (серые линии). Пункт наблюдений Горнотаежное

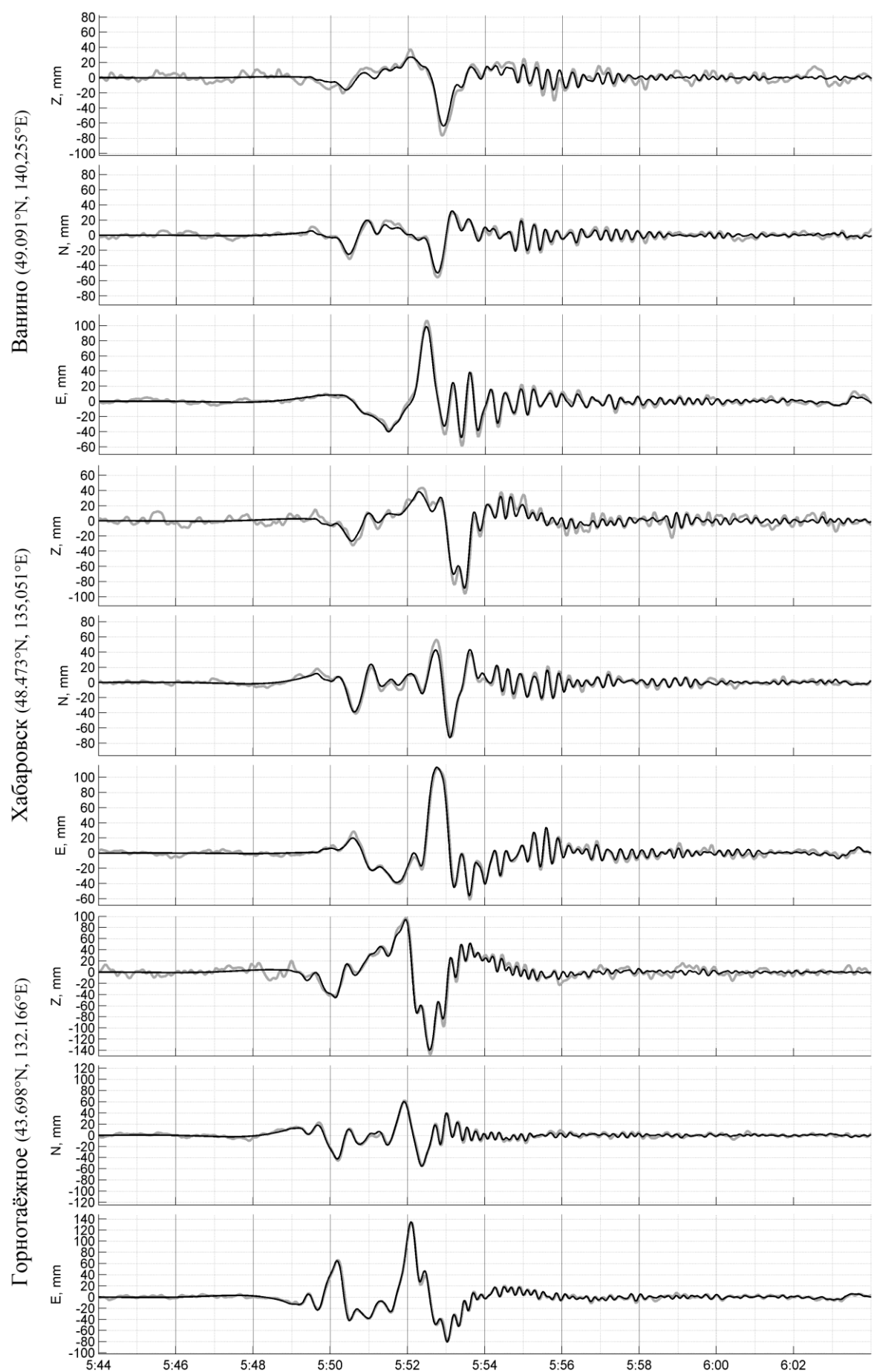


Рис. 3. Наложение волновых форм землетрясения Тохoku, полученных сейсмическим (чёрные линии) и геодезическим методами (серые линии). По горизонтальной оси отмечено время, UTC, по вертикальной – смещение в мм. Z – вертикальная компонента, N – северная, E – восточная.

Результаты и выводы

На рис. 3 показаны результаты сопоставления волновых форм землетрясения Тохоку, полученных сейсмическим и геодезическим методами в пунктах Ванино, Хабаровск и Горностаёжное в частотном диапазоне от 0.004 до 0.1 Гц.

Из трех частотных диапазонов в качестве оптимального был выбран второй диапазон (от 0.004 до 0.1 Гц). По сравнению с другими рассмотренными частотными диапазонами, в нем исключена лишь небольшая часть спектра сейсмических волн, зато сохранена высокая степень идентичности волновых форм, полученных различными методами.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Обработанные по описанной выше методике волновые формы землетрясения Тохоку, полученные сейсмическим и геодезическим методами, хорошо согласуются друг с другом. Амплитуды и фазы колебаний в диапазоне частот от 0.004 до 0.1 Гц практически совпадают, их различие не превышает ошибку определения положения GPS приемника.

2. Перегруз сейсмометра REF TEK 151-120 не привел к заметному понижению точности регистрации колебаний. Представляется возможным интегрирование записей, содержащих перегруз, после его частичного исправления.

Заключение

Попытки сравнения и сопоставления сейсмических и геодезических кинематических данных предпринимались и ранее. В работе [2] отмечается, что дважды проинтегрированные записи акселерометров не дают реалистичную запись после землетрясения; приведен пример несоответствия записей двух близкорасположенных акселерометров. В работе [3] произведено сопоставление волновых форм землетрясения Denali ($M=7.9$) 03.11.2002 на Аляске, полученных акселерометром и GPS приемником, и получены удовлетворительные результаты.

В настоящей работе была возможность использовать для сопоставления широкополосные сейсмометры. На большом удалении от эпицентра преобладали низкочастотные колебания, поэтому не было существенного перегруза широкополосных сейсмометров даже при значительных амплитудах колебаний, составивших до 250 мм. Таким образом, была достигнута высокая точность регистрации колебаний обоими методами, недостижимая при использовании акселерометров или при малых амплитудах.

Полученные результаты могут служить основанием широкого применения GPS в сейсмологии и дальнейшей работы по изучению совместного использования GPS и сейсмических данных.

Автор благодарен В.А. Бормотову за постановку задачи и помощь в работе, Н.В. Шестакову за предоставленную кинематическую обработку GPS измерений.

Работа выполнена в рамках целевой комплексной программы научных исследований ДВО РАН "Современная геодинамика, активные геоструктуры и природные опасности Дальнего Востока России" (2009-2013 гг.) и при поддержке гранта ДВО РАН (проект 13-III-B-08-001).

Список литературы

1. Ge L., Han S., Rizos C., Ishikawa Y., Hoshiba M., Yoshida Y., Izawa M., Hashimoto N., Himori S. GPS seismometers with up to 20-Hz sampling rate // *Earth Planets Space*. 2000. V.52. N 10. P.881–884.
2. Larson, K. GPS seismology // *J Geod.* 2009. V.83. P.227–233.
3. Larson, K., P. Bodin, J. Gomberg. Using 1-Hz GPS data to measure deformations caused by the Denali fault earthquake // *Science*. 2003. V.300. P.1421-1424.
4. Yue H., T. Lay. Inversion of high-rate (1 sps) GPS data for rupture process of the 11 March 2011 Tohoku earthquake (M_w 9.1) // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V.38. L00G09.