

УДК 550.34.03

Суммирование записей ядерных взрывов, зарегистрированных мировой сетью сейсмических станций

© 2011 г. В.Ю. Бурмин, Д.С. Кравцов

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Приведены методика и результаты суммирования сейсмограмм ядерных взрывов, которые были зарегистрированы мировой сетью сейсмических станций в период с 1980 по 1988 гг. Суммирование сейсмограмм, полученных на одной сейсмической станции от источников, расположенных в одном и том же месте, позволяет существенно повысить отношение полезного сигнала к шуму. Это в свою очередь позволяет более уверенно проводить корреляцию различных сейсмических волн, приходящих на сейсмические станции после первых вступлений, в частности обменных и отраженных волн от различных границ в недрах Земли.

Ключевые слова: сейсмический сигнал, суммирование, корреляция.

PACS: *43.40.Ph

Введение

Построение сейсмических моделей земной коры, мантии и ядра до настоящего времени представляет собой актуальную проблему изучения строения Земли. Для решения этой задачи, как правило, используются сейсмические волны, распространяющиеся от взрывов и землетрясений. Использование записей сейсмических волн от взрывов позволяет строить скоростные сейсмические разрезы для изучения строения Земли более надежно, чем по записям от землетрясений. Причина этому очевидна: в случае взрыва мы точно знаем положение и время источника. В случае землетрясения, координаты гипоцентра и время в очаге известны с погрешностями и зачастую не малы.

Недостаток химических взрывов – их относительно маленькая мощность. Например, при работах методом глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) наибольшая их мощность достигает не более нескольких тонн в тротиловом эквиваленте (см., например, [Глубинное..., 1996]). Значительную мощность, как правило, имеют промышленные взрывы (до 500 тонн), но это всегда “сухие”, рассредоточенные взрывы, большая часть энергии которых идет на разрушение горной породы, и поэтому их мощность недостаточна для исследования глубоких недр Земли. Мощность взрывов при ядерных испытаниях (в основном в СССР и США) составляет десятки и сотни килотонн в тротиловом эквиваленте, а некоторые из них подобны землетрясениям с магнитудой 6.5, что позволяет использовать их для изучения самых глубоких недр Земли.

Кроме этого, к большим преимуществам ядерных взрывов, проводимых при испытаниях ядерного оружия, следует отнести тот факт, что они происходят практически в одних и тех же местах. Это обстоятельство позволяет проводить суммирование сейсмограмм, полученных на одних и тех же сейсмических станциях, что приводит к существенному повышению отношения полезного сигнала к сейсмическому шуму. Наглядным примером применения такой процедуры может служить суммирование сейсмических сигналов по данным лунного сейсмического эксперимента “Аполлон” (см., например, [Weber at al., 2011]) (рис. 1).

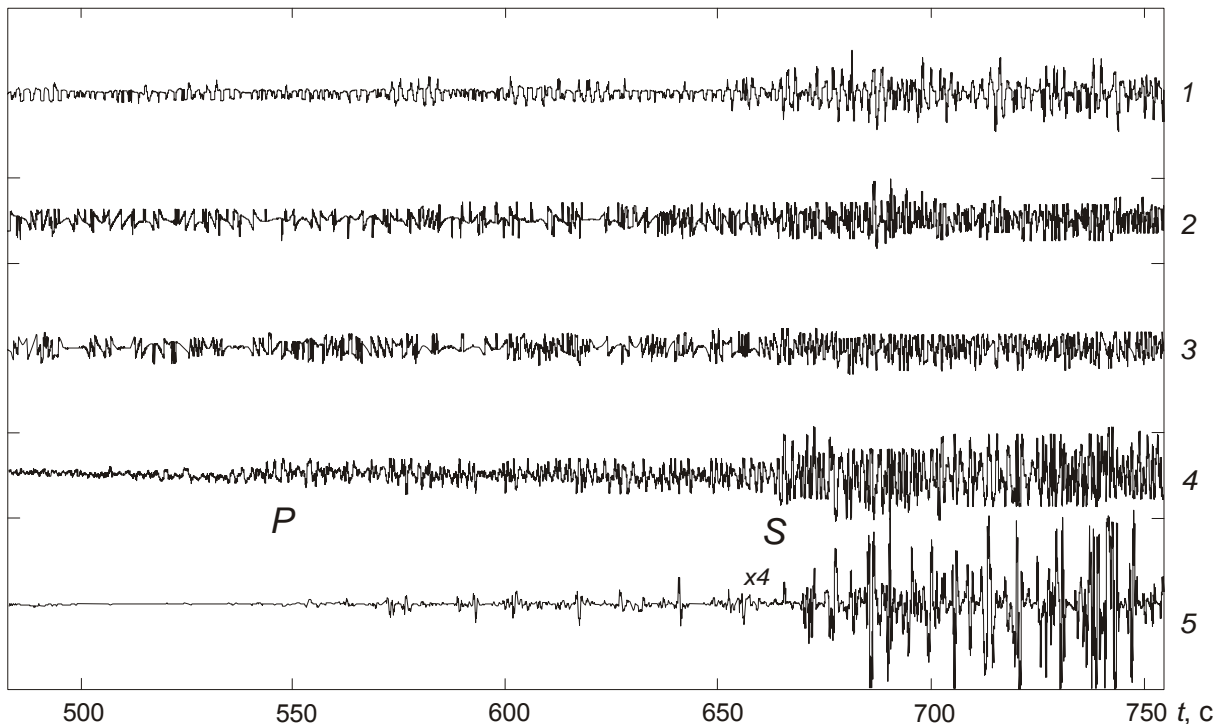


Рис. 1. Сейсмограммы R -компонент трех событий, зарегистрированных одной станцией (1–3); суммарная трасса R -компонент этих событий (4); та же суммарная трасса после поляризационной фильтрации (5). На одиночных сейсмограммах (1–3) приход P -волны трудно выделить, так как амплитуда полезного сигнала не превышает уровень микросейсм вплоть до прихода S -волны. Суммирование поднимает амплитуду P - и S -волн, но промежуточные вступления маскируются P - и S -волнами. Поляризационная фильтрация позволила выделить вступления двух фаз между P - и S -волнами [Weber et al., 2011]

Исходные данные

В работах [Бурмин, 2004а,б, 2006] для построения скоростной модели Земли были использованы цифровые сейсмограммы Национального информационного центра о землетрясениях (NEIC) мировых сейсмологических данных департамента геологической службы США, полученные мировой сетью за период с 1980 по 1988 гг.

Помимо записей сейсмических сигналов от землетрясений, эти данные содержат также записи сигналов от ядерных взрывов, проводившихся различными странами в этот период. Эти данные содержат записи длиннопериодных, промежуточных и короткопериодных сейсмографов. Для интерпретации нами были использованы записи короткопериодных приборов (с полосой пропускания от 0.1 до 6 Гц), поскольку они имеют более высокую разрешающую способность.

К сожалению, цифровые сейсмограммы NEIC имеют разную длину и даже перемены в записях, что затрудняет полноценное их суммирование и, соответственно, выделение отдельных фаз в последующих вступлениях. Тем не менее мы провели такую процедуру и получили, на наш взгляд, вполне удовлетворительные результаты, по крайней мере для начальной части сейсмограмм.

Данные о ядерных взрывах (местоположение и момент взрыва), проведенных различными странами, были взяты из работы [Yang et al., 2002]. Были просмотрены все записи сейсмических волн от всех землетрясений за указанный период, зарегистрированных мировой сетью сейсмических станций. Записи были отфильтрованы в полосе частот 0.5–5.0 Гц.

Суммирование записей сейсмических волн

Поскольку записи сейсмических станций от взрывов из одного и того же места на одной сейсмической станции имеют различную длину как полезной части, так и части записи, предшествующей полезному сигналу, возникает задача выбора начала суммирования каждой записи. Она решается следующим образом.

Сначала начальные части всех записей обрезались таким образом, чтобы длина участка от начала записи до видимого первого вступления составляла 50 точек при частоте оцифровки 20 Гц и 100 точек при частоте оцифровки 40 Гц, что в обоих случаях соответствует 2.5 с. Затем относительно одной записи, выбранной случайным образом, в автоматическом режиме вычисляется коэффициент корреляции (q) с другими записями. Коэффициент корреляции вычисляется по известной формуле [Худсон, 1973]:

$$q = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{s_x s_y},$$

где \bar{x} и \bar{y} – средние значения по выборочным распределениям x_i и y_i в отдельности, а s_x и s_y – соответствующие среднеквадратичные отклонения.

При этом анализировались записи длиной 17 с со сдвигом в 3-секундном окне. Это окно соответствует сдвигу на 1.5 с относительно первого вступления сейсмической волны на текущей записи (± 1.5 с относительно 50-й точки текущей записи). В качестве начальной точки суммирования выбиралась точка, соответствующая максимальному коэффициенту корреляции. На рис. 2 представлены 25-секундные нормированные записи пяти взрывов и суммарная сейсмограмма после выбора соответствующих точек для начала суммирования. В таблице приведены коэффициенты корреляции между различными записями взрывов из одного места на одной сейсмической станции.

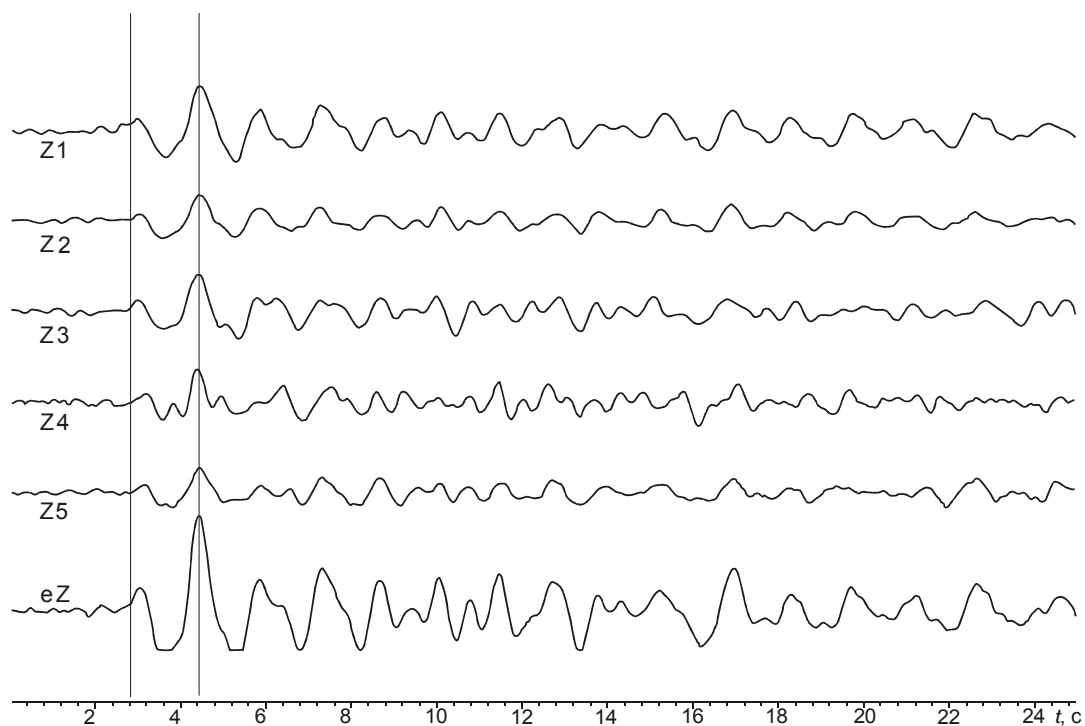


Рис. 2. Начальная 25-секундная часть записей пяти взрывов и суммарной сейсмограммы (нижняя трасса) после выбора соответствующих точек для начала суммирования

Коэффициенты взаимной корреляции сейсмических записей разных взрывов из одного того же места на одной станции

№ записей	2	3	4	5
1	0.9285	0.7943	0.5572	0.8317
2		0.7799	0.4877	0.8413
3			0.6237	0.7683
4				0.5916

Две вертикальные линии на рис. 2 показывают вступление P -волны и положительный импульс с максимальной амплитудой на записях и приведены для того, чтобы показать, насколько различные записи синфазны.

После вычисления коэффициентов корреляции и корректировки записей проводилось их поточечное суммирование. Результирующие сейсмограммы представлены в виде монтажа сейсмограмм вертикальной компоненты сейсмографов в диапазоне эпицентральных расстояний от 0° до 180° и времен от 0 до 1200 с, в редукции 0.52 град/с (рис. 3). Каждая запись нормирована на максимальную амплитуду колебаний в трассе. Кроме этого, на рис. 3 нанесены теоретические годографы рефрагированной и отраженных продольных волн, рассчитанные по скоростной кривой (рис. 4), полученной в работах [Бурмин, 2004а,б, 2006]. На рис. 3 видно, что теоретический годограф рефрагированной волны достаточно хорошо согласуется с первыми вступлениями продольных волн.

В заключение следует сказать, что для выделения фаз определенных сейсмических волн на сейсмограммах можно суммировать не только записи от взрывов, для которых время и местоположение известны, но и записи сейсмических волн от землетрясений, происходящих в определенных местах, вводя, когда это необходимо, соответствующие поправки на глубину источника, как это делалось для лунных сейсмограмм.

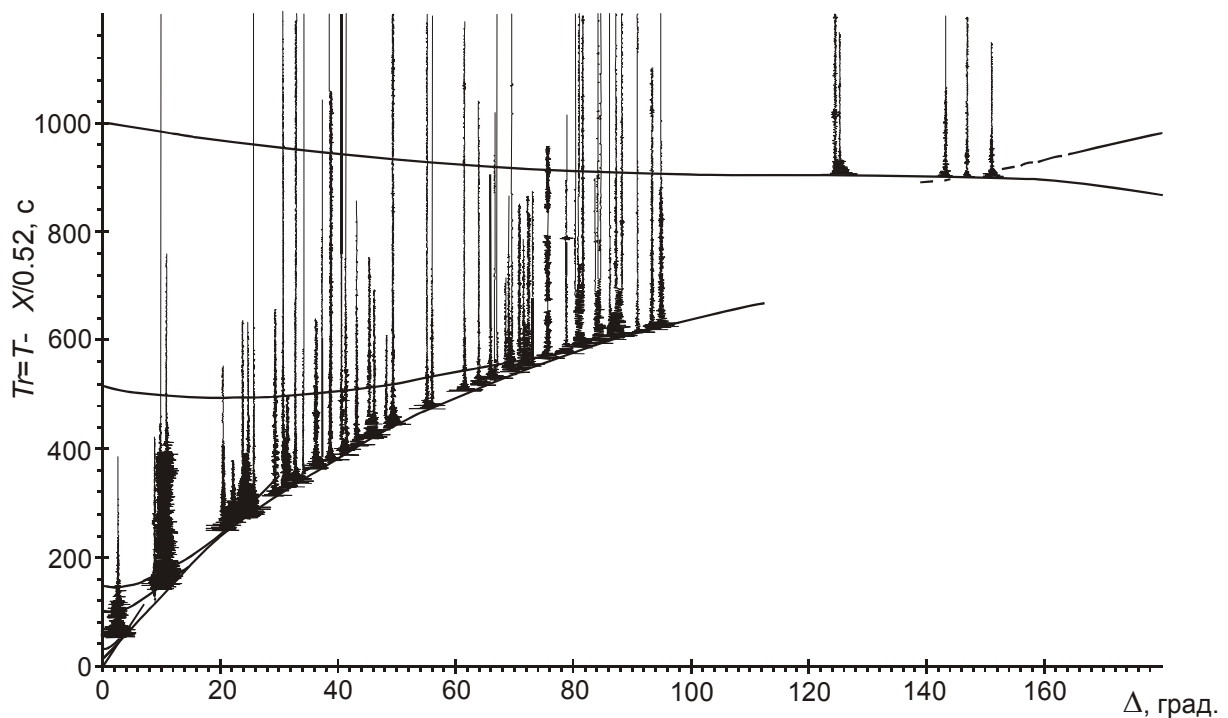


Рис. 3. Монтаж сейсмограмм от ядерных взрывов, зарегистрированных мировой сетью сейсмических станций в период с 1980 по 1988 гг.

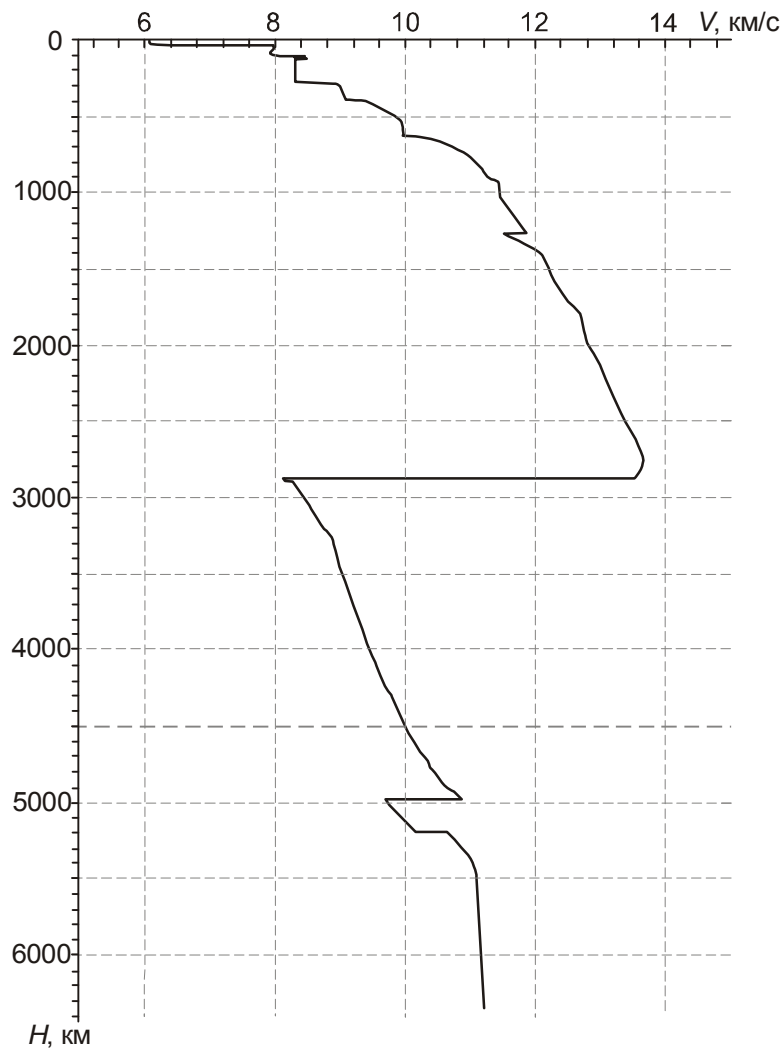


Рис. 4. Скоростная кривая для расчета теоретических годографов [Бурмин, 2006]

Литература

- Бурмин В.Ю. Скорость распространения сейсмических волн в земном ядре // Физика Земли. 2004а. № 6. С.24–41.
- Бурмин В.Ю. Скорость распространения продольных сейсмических волн в мантии Земли // Физика Земли. 2004б. № 8. С.34–40.
- Бурмин В.Ю. Распределение плотности и упругих параметров в Земле // Физика Земли. 2006. № 7. С.76–88.
- Глубинное сейсмическое зондирование литосферы на Анголо-Бразильском геотраверсе / Под ред. С.М. Зверева, И.П. Косминской, Ю.В. Тулиной. М.: НГК РАН, 1996. 148 с.
- Худсон Д. Статистика для физиков. М.: Мир, 1970. 296 с.
- Weber R.C., Lin Pei-Ying, Garnero E.J., Williams Q., Lognonne P. Seismic Detection of the Lunar Core // www.sciencexpress.org / 6 January 2011 / Page 1 / 10.1126/science.1199375.
- Yang X., North R., Romney C., Richards P. Worldwide Nuclear Explosions // International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology / Eds. W.H.K. Lee, H. Kanamori, P. Jennings, C. Kisslinger on behalf of the International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior. Academic Press, 2002. Chapter 84.
http://www.ldeo.columbia.edu/~richards/my_papers/WW_nuclear_tests_IASPEI_HB.pdf

Сведения об авторах

БУРМИН Валерий Юрьевич – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: (499) 254-68-95. E-mail: burmin@ifz.ru

КРАВЦОВ Дмитрий Сергеевич – аспирант, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: (499) 254-68-95. E-mail: lab303@ifz.ru

Stacking of records of nuclear explosions based on the data of the world seismic station network

V.Yu. Burmin, D.S. Kravtsov

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Techniques and outcomes of stacking of the seismograms of nuclear explosions based on the data of the world seismic station network recorded in 1980–1988 are described. The stacking of the seismograms obtained at the same seismic station from the sources located at the same place essentially increases signal/noise ratio. It allows a researcher to correlate different seismic waves, arriving on seismic stations after the main arrivals, more confidently in particular, converted and reflected waves from different boundaries in the solid Earth.

Keywords: seismic signal, stacking, correlation.