

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ТРАССАХ БОЛЬШОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ

В. И. Юшин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,

630090, Новосибирск, Россия

УДК 550.83, 551.1

Представлены результаты уникального советско-японского эксперимента, основанного на использовании мощных сейсмических вибраторов, разработанных в Новосибирском научном центре, и новейшей японской регистрирующей аппаратуры. Исследовано затухание вибрационных колебаний на удалениях от 22 до 320 км от источника.

Ключевые слова: вибросейсмические сигналы, затухание волн, вибрационное просвечивание Земли.

The results of a unique Soviet-Japanese experiment are presented. The experiment was based on the use of powerful seismic vibrators designed and made in the Novosibirsk scientific center, and the latest Japanese recording equipment. The damping of vibration oscillations at distances from 22 up to 320 km from the source has been studied.

Key words: vibroseismical signals, wave attenuation, vibro-radiation of the Earth.

Введение. В августе 1995 г. в Сибирском отделении РАН по инициативе академика А. С. Алексеева, был проведен уникальный российско-японский геофизический эксперимент по просвечиванию твердой оболочки Земли с помощью сейсмических вибраторов. Эксперимент выполнялся, чтобы доказать мировому сообществу сейсмологов принципиальную возможность изучения глубинных структур земной коры с помощью невзрывных управляемых источников сейсмических колебаний. К тому времени исполнилось уже 15 лет, как был построен и начал регулярно эксплуатироваться 100-тонный стационарный вибрационный сейсмический источник ЦВ-100 [1], первые сейсмограммы от которого на удалениях до 280 км были получены еще в 1980 г. [2, 3].

Несмотря на авторитетные публикации об этом достижении [4, 5], открывающем новые горизонты в области активной сейсмологии, в обществе зарубежных сейсмологов наблюдался известный скепсис, который требовалось развеять.

В эксперименте принимали участие Новосибирская вибросейсмическая экспедиция (НОМ-ВЭ, ныне Алтае-Саянская опытно-методическая экспедиция СО РАН (АСОМСЭ)), Вычисли-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 12-05-00337).

тельный центр СО РАН (ныне Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН), Институт геофизики СО РАН (ныне Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН) и Токийский университет (Япония), представленный группой сейсмологов, возглавляемой всемирно известным ученым Дж. Касахарой.

В качестве источников колебаний использовались разработанные в 1980-х годах в СО АН СССР в рамках Государственной программы "Вибрационное просвечивание Земли" мощные дебалансные вибраторы ЦВ100, ЦВ40 и гидрорезонансный вибратор ГРВ, расположенные тесной группой на полигоне вблизи с. Быстровка Искитимского района Новосибирской области. Регистрация вибросигналов проводилась на нескольких видах аппаратуры, как разработанной к тому времени российскими участниками эксперимента, так и привезенной гостями. Японцы предоставили четыре новейших на тот момент автоматических цифровых станции с программируемой по времени записью и GPS-синхронизацией. Это позволило одновременно регистрировать одни и те же сеансы вибровоздействия идентичной аппаратурой сразу в нескольких разнесенных по дальности точках. Благодаря тому, что измерительно-регистрирующие каналы всех этих записей имели достоверно идентичную калибровку, а виброисточники, часть которых эксплуатируется до сих пор, обеспечивали, как неоднократно было подтверждено, исключительно высокую точность воспроизведения частоты и фазы колебаний, задаваемой цифровым синтезатором, записи этого масштабного и дорогостоящего эксперимента оказались уникальными в метрологическом отношении. В качестве датчиков использовались откалиброванные трехкомпонентные сейсмометры СК1П российского производства. Идентичность характеристик сейсмометров и регистраторов, подтвержденная калибровочными экспериментами, гарантировала достоверность всего комплекса данных. Хотя первоначально в цели эксперимента задача измерения абсолютных уровней вибросигнала не входила, сохранившиеся первичные цифровые записи содержали все необходимое для решения такой задачи. Эти записи ныне позволили получить достоверную информацию по затуханию вибросейсмических колебаний в диапазоне удалений 22–320 км. Настоящая статья посвящена решению данной задачи. Теоретическое обоснование методики исчисления абсолютных амплитуд вибросигналов, лежащих ниже уровня шума, по их коррелограммам или спектрограммам приведено в [6]. Разработанная методика позволила измерить абсолютные уровни порожденных вибраторами сейсмических колебаний в пунктах приема, несмотря на то, что эти уровни лежали много ниже уровня окружающего шума.

Система наблюдений. Всего было отработано 7 пунктов приема. 6 из них располагались на удалениях от 22 до 75 км вдоль географической параллели по профилю восточного относительно вибратора направления, а седьмой был размещен на удалении 320 км в южном направлении, вблизи п. Новофирсово Курьинского района Алтайского края. В табл. 1 приведены GPS-координаты источника и пунктов наблюдения.

С целью снижения уровня окружающего шума работа выполнялась в ночное время.

Характеристика вибровоздействий. Применялось монохроматическое и широкополосное зондирование. Стотонный вибратор генерировал два типа вибровоздействий: последовательный перебор шести фиксированных частот (6,0, 6,25, 6,5, 6,75, 7,0, 7,25 Гц) общей продолжительностью 60 минут с 10-минутной работой на каждой частоте и линейную развертку частоты (сви́п-

Таблица 1

| Координаты вибратора и регистраторов | | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------|---------------|
| Место | Широта | Долгота | Дальность, км |
| | Координаты по данным GPS - приемника | | |
| Вибратор | 54° 33' 48,5" | 82 ° 39' 15,3" | |
| J1 | 54° 32' 01,6" | 82 ° 59' 47,7" | 22,42 |
| J2 | 54°:31' 55,8" | 83 ° 04' 29,0" | 27,46 |
| J3 | 54° 30' 09,5" | 83 ° 10' 03,0" | 33,94 |
| J4 | 54° 27' 26,2" | 83 ° 33' 54,8" | 60,23 |
| J5 | 54° 27' 15,0" | 83 ° 44' 55,9" | 72,00 |
| J6 | 54° 27' 05,9" | 83 ° 48' 08,6" | 75,47 |
| | По топографической карте | | |
| J300 | 51 ° 41,1' | 82 ° 17,5' | 320,00 |

сигнал) от 5,5 до 8 Гц длительностью 47 мин. Сорокаторный вибратор излучал свип-сигнал в полосе 6,25–10,5 Гц.

Методика обработки данных. Главной целью новой обработки было определение абсолютных уровней амплитуд вибросигналов в монохроматических и широкополосных режимах на разных удалениях от одних и тех же поверхностных источников и установление на этой основе законов затухания сейсмических колебаний с удалением от источника. Записи монохроматических колебаний обрабатывались двумя способами: амплитудным спектральным анализом, масштабированным в соответствии с алгоритмом "Спектр амплитуд гармоник" [7], и цифровыми селективными фильтрами из пакета Matlab. Спектр амплитуд гармоник вычисляется через дискретное или классическое преобразование Фурье с учетом фактической длительности вибросигнала в окне записи [7]:

$$g(n) = \frac{2|Y_n|}{L},$$

где Y_n – БПФ исходного временного ряда, дополненного нулями до необходимой длины массива, L – число "активных" отсчетов записи, содержащих вибросигнал, и преобразованных в физические единицы движения (колебательную скорость или смещение) через соответствующие калибровочные коэффициенты датчика и регистратора.

Результаты амплитудно-частотного спектрального анализа. На рис. 1 показаны типичные примеры спектров амплитуд гармоник. Приведенные спектры получены при регистрации в пунктах J1 (22,5 км); J4 (60 км) и J300 (320 км), при работе вибратора ЦВ100 на шести различных частотах: 6; 6,25; 6,5; 6,75; 7,0 и 7,25 Гц. По результатам обработки никакой закономерности в распределении амплитуд гармонических сигналов фиксированных частот по компонентам X , Y , Z обнаружить не удалось. Похоже, что главную роль играют непредсказуемые причуды "муара" монохроматической интерференции. По-видимому, при оценке затухания по результатам спектрального анализа одноточечной трехкомпонентной записи целесообразно ориентироваться просто на максимальную по амплитуде компоненту, независимо от ее поляризации. В случае монохроматических колебаний это наиболее рациональный подход. Поэтому на графиче-

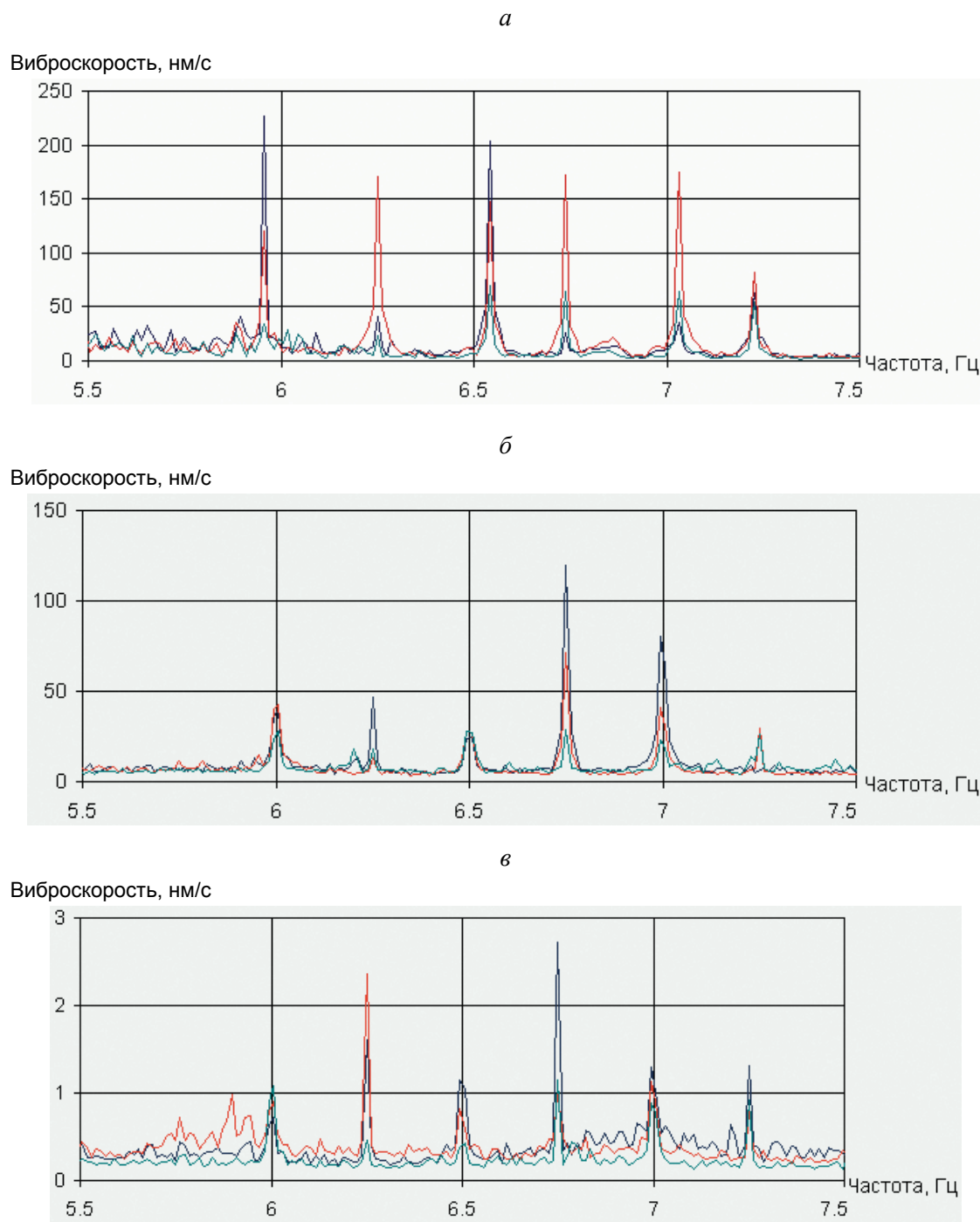


Рис. 1. Спектр амплитуд гармоник вибратора ЦВ100 на удалении: 22,5 км (*a*) (в этом эксперименте неопытный оператор вибратора неточно устанавливал фиксированные частоты); 60 км (*б*); 320 км (*в*)

ках, приведенных на рис. 1 все три компоненты спектров в каждом пункте приема показаны с наложением и различаются только цветом, и при дальнейшем анализе мы принимали во внимание только максимальную из компонент.

Напомним, амплитуды спектральных линий на спектрах гармоник (рис. 1) равны амплитудам аддитивных детерминированных гармонических компонент входного сейсмического шума и имеют размерность колебательной скорости.

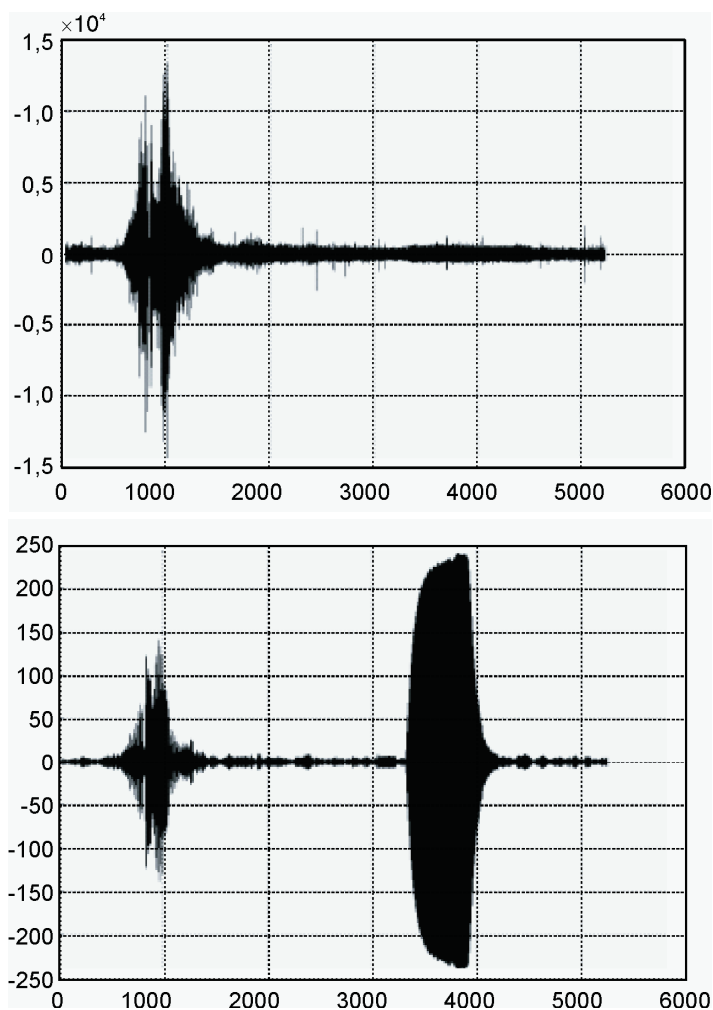


Рис. 2. Селективная фильтрация вибросейсмического сигнала частоты 6,75 Гц на удалении 27,5 км от источника ЦВ100. Показаны входной сигнал в широкой полосе (верхний график) и результат его селективной фильтрации с добротностью 3000 (нижний график): ось X – время в секундах, ось Y – видимая амплитуда сигнала вверху – до и внизу – после фильтра. Амплитуды сигналов показаны в квантах АЦП

Селективная частотная фильтрация. Анализ монохроматических колебаний вибратора на всех пунктах приема был проконтролирован также с помощью цифровой селективной фильтрации. Важным достоинством этого способа, в отличие от спектрального, является разрешенность во времени и единичный коэффициент передачи на частоте пропускания. Другими словами, если на входе фильтра существует замаскированное шумом гармоническое колебание, на частоту которого настроен фильтр, то выходной сигнал последнего будет иметь амплитуду этого колебания, тогда как другие спектральные компоненты будут подавлены. От добротности фильтра зависит только уровень остаточного шума. Селективная фильтрация в принципе дает ту же амплитудную информацию о сигнале, что и спектральный анализ, с той лишь разницей, что последний обеспечивает разрешенность сигнала по частоте, а фильтрация – по времени. Поэтому эти методы удачно дополняют друг друга.

На рис. 2 показан пример работы селективного фильтра как анализатора записи сейсмического сигнала полуторачасовой продолжительности, во время которой вибратор ЦВ100 в одном из 10-минутных интервалов работал на частоте настройки фильтра 6,75 Гц. Первый выброс на

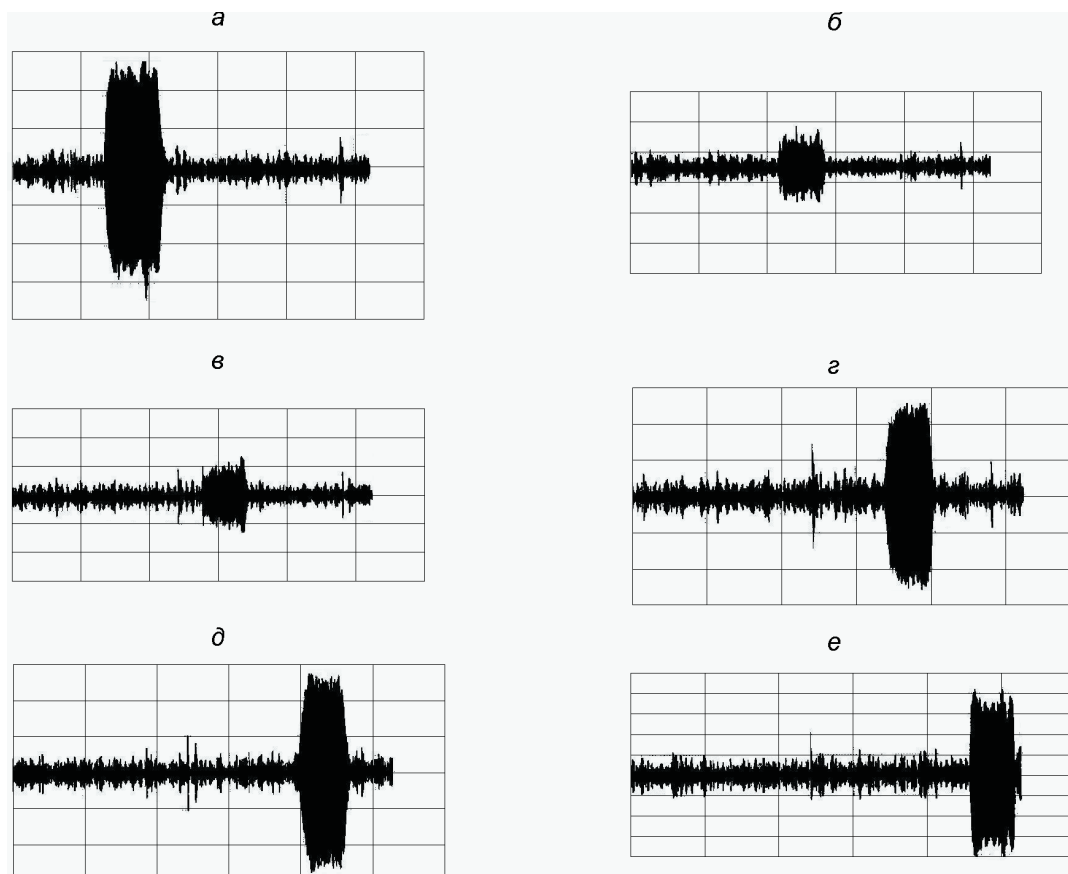


Рис. 3. Выделение монохроматических вибросигналов 100-тонного вибратора на удалении 320 км цифровыми селективными фильтрами с добротностью 1000. Z-компонента.

Длительность работы вибратора на каждой частоте равна 10 мин.

Частота равна: 6,0 Гц (а); 6,25 Гц (б); 6,5 Гц (в); 6,75 Гц (г); 7,0 Гц (д); 7,25 Гц (е)

записи – это результат "ураганной" помехи, вызванной движением людей в непосредственной близости датчика.

На обоих графиках амплитуда показана в квантах цифрового кода. Для перевода ее в единицы физического движения почвы – колебательную скорость (нм/с) – код амплитуды необходимо умножить на коэффициент преобразования сейсмического канала, равный в данном случае 0,5 нм/с/квант.

Результаты селективной фильтрации сигнала вибратора ЦВ100, работающего в течение часа попеременно по 10 мин. на нескольких разных фиксированных частотах, показаны на рис. 3.

Обобщенные результаты затухания амплитуд монохроматических сигналов на удалениях 22–320 км. Результаты измерений амплитуд монохроматических зондирований по всем семи пунктам в диапазоне расстояний 22–320 км и трем компонентам сведены в табл. 2 и в диапазоне 22–72 км отображены графиком на рис. 4.

При выборе аппроксимирующей функции мы учли следующие обстоятельства. Наряду с неоспоримыми достоинствами монохроматических сигналов с точки зрения помехоустойчивости, они обладают существенной особенностью, о которой уже было упомянуто выше, и которую можно назвать пространственно-частотной нестабильностью. Природа этого явления была исследована и объяснена в работе [8]. Она заключается, образно говоря, в очень высокой степени "мозаичности" волнового поля, поскольку сейсмический сигнал обладает ярко выраженной

Таблица 2

Сводная таблица амплитуд монохроматических вибросигналов в нм/с на удалениях 22–320 км

| Дист., км | 22,5 | 22,5 | 22,5 | 27,5 | 27,5 | 27,5 | 34 | 34 | 34 | 60 | 60 | 60 | 72 | 72 | 72 | 320 | 320 | 320 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-------|
| Част, Гц | J1X | J1Y | J1Z | J2X | J2Y | J2Z | J3X | J3Y | J3Z | J4X | J4Y | J4Z | J5X | J5Y | J5Z | F0012 | F0012 | F0012 |
| 6,00 | 227 | 120 | 35 | 112 | 171 | 61 | 39 | 43 | 28 | 31 | 19 | 41 | 8 | 16 | 12 | 0,7 | 1,0 | 1,1 |
| 6,25 | 41 | 171 | 25 | 30 | 22 | 127 | 46 | 13 | 18 | 20 | 31 | 9 | 15 | 47 | 22 | 1,6 | 2,4 | 0,5 |
| 6,50 | 204 | 148 | 70 | 146 | 64 | 98 | 24 | 28 | 28 | 32 | 60 | 47 | 31 | 12 | 32 | 1,2 | 0,8 | 0,4 |
| 6,75 | 26 | 172 | 64 | 77 | 61 | 80 | 120 | 71 | 29 | 26 | 39 | 16 | 54 | 22 | 12 | 2,7 | 1,0 | 1,1 |
| 7,00 | 36 | 174 | 64 | 46 | 35 | 58 | 80 | 41 | 23 | 19 | 10 | 14 | 18 | 16 | 11 | 1,3 | 1,1 | 0,9 |
| 7,25 | 62 | 83 | 54 | 44 | 66 | 47 | 9 | 29 | 26 | 32 | 42 | 14 | 10 | 18 | 20 | 1,3 | 0,8 | 0,9 |

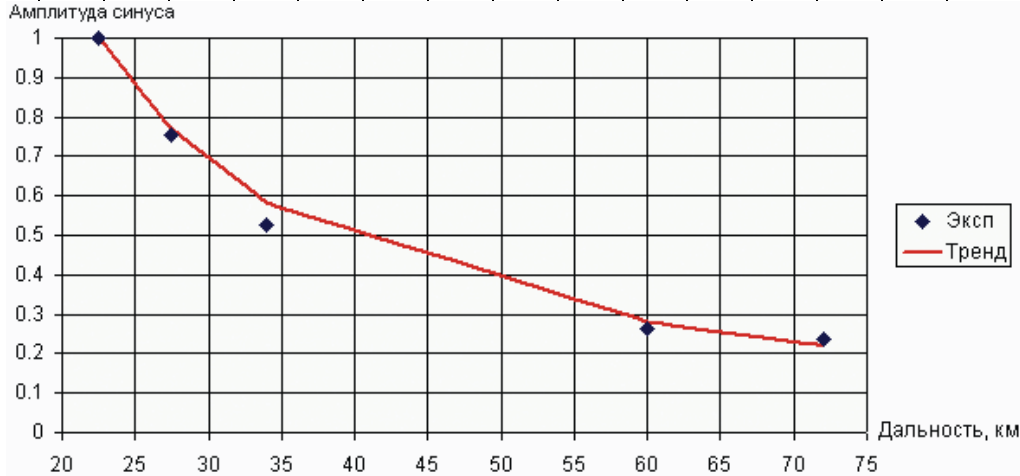


Рис. 4. Относительные амплитуды монохроматических сейсмосигналов на удалениях 22,5– 72 км от источника в полосе частот 6–7,25 Гц и их аппроксимация степенной функцией. Степень затухания равна 1,3

многолучевостью. Последняя приводит к сильнейшей интерференции монохроматических колебаний, в результате которой в одних пунктах приема образуется очень большая суммарная амплитуда гармонического сигнала, в то время как в соседних, иногда незначительно отстоящих по дальности, амплитуда сигнала этой же самой частоты может упасть почти до нуля.

Данное явление в конечном счете приводит к большому разбросу оценок амплитуд, достигающих до 100 % среднего значения. Как правило, интерференция разных компонент независима. Поэтому при анализе затухания монохроматических колебаний целесообразно принимать во внимание только максимальную по амплитуде компоненту, игнорируя ее поляризацию. Полученный в результате именно такого анализа график относительных амплитуд монохроматических колебаний вибратора ЦВ100 в диапазоне удалений 22,5–72 км был приведен на рис. 4. Удовлетворительную аппроксимацию изменения амплитуд дала в данном случае аналитическая зависимость относительной амплитуды монохроматического сигнала от безразмерной дальности r_0/r

$$A(r) = A_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^\Lambda, \tag{1}$$

где r_0 – начальная дальность (в данном случае $r_0=22,5$ км), A_0 – фактическая амплитуда сигнала на начальной дальности. Показатель степени оказался близок к $\Lambda=1,3$.

Диапазон расстояний от 72 до 320 км в эту аппроксимацию не вписался. Для него в семействе степенных функций была подобрана аналогичная формула, но с другими параметрами, в

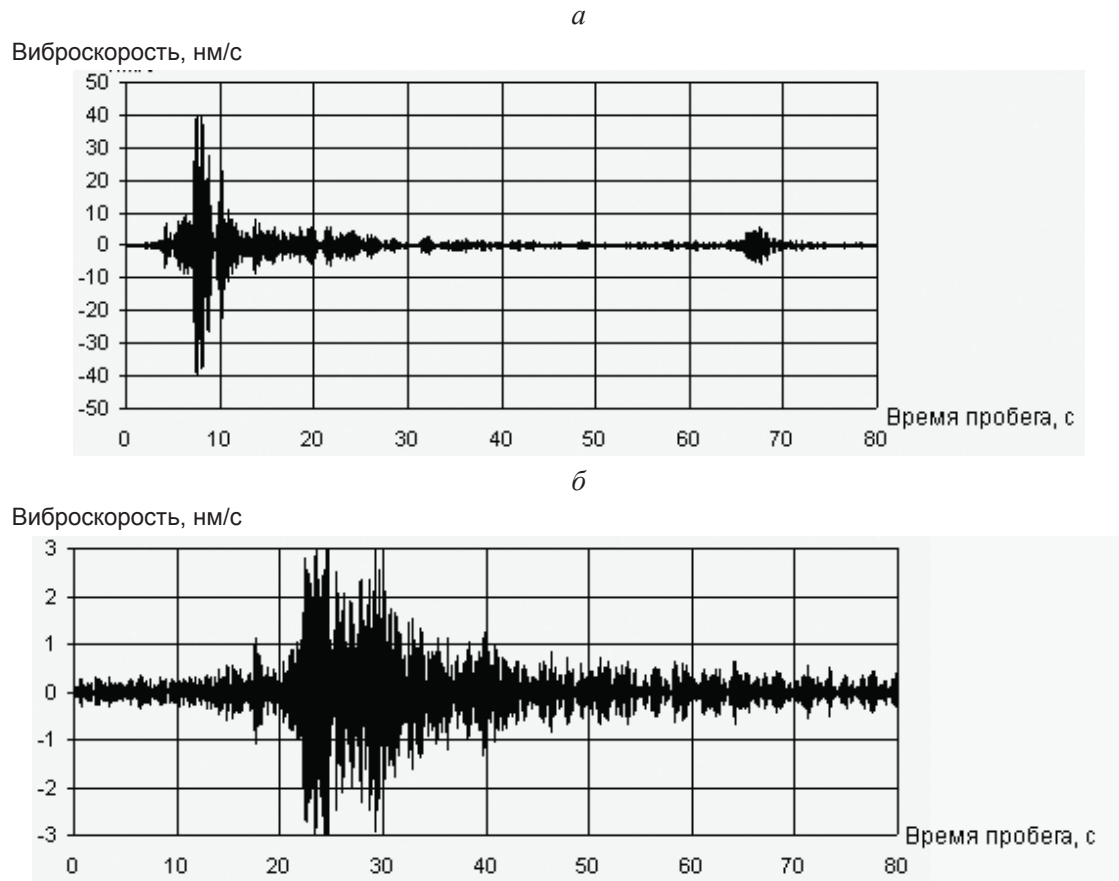


Рис. 5. Коррелограмма вибросигнала в полосе частот 6,25–10,1 Гц, вибратор ЦВ40, излучающий приблизительно в 1,5 раза менее интенсивный сигнал, чем вибратор ЦВ100, работающий в более высокочастотном диапазоне:

a – удаление от источника ЦВ40 22,5 км; *б* – удаление 72 км

которой в качестве начальной амплитуды A_0 берется конечная точка предыдущего диапазона ($r_0=72$ км), а показатель степени рассчитывается как

$$\Lambda = \lg \left(\frac{A(r)}{A_0} \right) / \lg \left(\frac{r_0}{r} \right). \quad (2)$$

Подставляя в (2) экспериментальные значения $r_0=72$ км, $r=320$ км, $A_0(r=75 \text{ км})=98$ и $A(r=320 \text{ км})=2,7$, получаем показатель степени затухания на интервале 72–320 км $\Lambda=2$.

Результаты анализа затухания амплитуд широкополосных вибросигналов на удалениях 22–320 км. Более общие результаты по изучению затухания дает широкополосное вибрзондирование с помощью непрерывных разверток частоты – свипов. Хотя вибросигналы в пунктах приема лежат ниже уровня окружающего шума, операция взаимной корреляции с сигналом вибратора – согласованная фильтрация, выполняемая в цифровой форме, – позволяет восстановить их истинные амплитуды.

В коррелограмме отдельные сейсмические лучи разделяются во времени, и интерференция существенно ослабляется, оказывая влияние только на близкие по временам пробега волны.

На рис. 5 показаны примеры коррелограмм вибросигналов, полученных на удалениях от вибратора ЦВ40 22,5 и 72 км, соответственно, в полосе частот от 6,25 до 10,1 Гц. Коррелограмм-

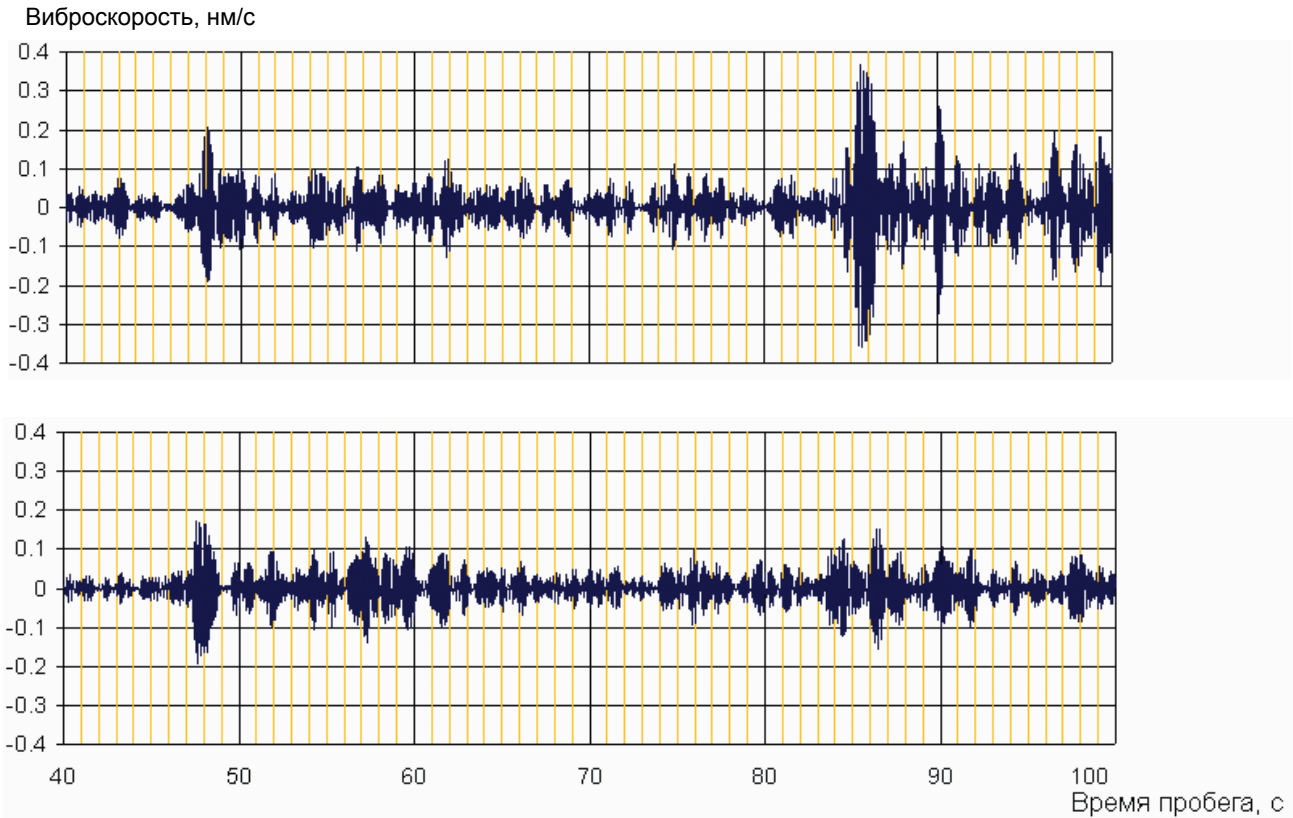


Рис. 6. Коррелограммы X - и Z -компонент свип-сигнала вибратора ЦВ100 на дальности 320 км

мы масштабированы по амплитудному алгоритму [6]. Такое масштабирование гарантирует, что видимая на графике амплитуда коррелограммы, несмотря на импульсную форму последней, показывает, какова была бы в среднем амплитуда свип-вибросигнала в точке приема, если бы шум отсутствовал. Поэтому такая коррелограмма более адекватно, нежели спектрограмма, отображает затухание всякого непрерывного колебания такого же частотного диапазона.

Попутно отметим важный эффект – проявления в сейсмических записях атмосферно-акустического канала распространения вибросигнала. На коррелограмме, приведенной на рис. 5а, на 67-й секунде пробега просматривается компактный импульс акустической волны от вибратора, пробежавшей свой путь по воздуху со скоростью 334 м/с. Впервые этот эффект был обнаружен в экспериментах, проводимых под руководством А. С. Алексеева [9], и детально исследован и истолкован в работе [10].

На рис. 6 приведены X - и Z -компоненты коррелограмм свип-сигнала вибратора ЦВ100 на дальности 320 км.

В табл. 3 представлены сводные результаты измерений максимальных амплитуд коррелограмм вибросигналов вибратора ЦВ100. На рис. 7 эти же амплитуды представлены графически в квантах цифровой записи (1 квант=0,5 мм/с).

Во всем указанном диапазоне расстояний удовлетворительной аппроксимацией может служить степенная функция (1) с показателем степени $\Lambda=1,88$ и $I_0=22,5$ км.

Таблица 3

Максимальные амплитуды свип-сигнала вибратора ЦВ100 на удалениях
22–320 км в полосе частот 5,5–8,5 Гц, нм/с

| Пункты | Дальность, км | X нм/с | Y нм/с | Z нм/с |
|--------|---------------|--------|--------|--------|
| J1 | 22,4 | 61,57 | 68,82 | 38,50 |
| J2 | 27,4 | 42,58 | 46,70 | 26,17 |
| J3 | 34 | 15,39 | 13,43 | 7,24 |
| J4 | 60 | 11,37 | 10,61 | 7,29 |
| J5 | 72 | 4,83 | 4,57 | 3,01 |
| J6 | 75,5 | 5,27 | 4,39 | 6,62 |
| J300 | 320 | 0,37 | 0,30 | 0,17 |

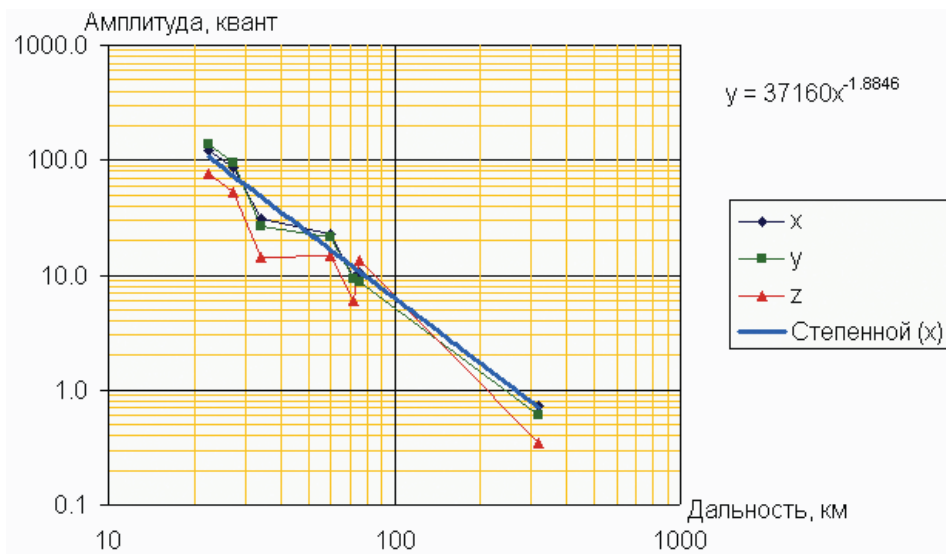


Рис. 7. График максимальных амплитуд коррелограмм в зависимости от расстояния от источника ЦВ100 в диапазоне дальностей 22 – 320 км. (1 квант=0,5 нм/с)

Как видим, параметры затухания монохроматических и широкополосных колебаний существенно различаются. В качестве обобщенного эмпирического (аналитического) параметра для формулы амплитудного затухания в диапазоне дальностей 20–300 км можно принять степенную функцию (1) с показателем степени $\Lambda = 1,9$.

Список литературы

1. МАКАРЮК Н. В., МАЛАХОВ А. П., РЯШЕНЦЕВ Н. П. Обоснование конструктивной схемы источника вибросейсмических колебаний для вибрационного просвечивания Земли // Исследование Земли невзрывными сейсмическими источниками. М.: Наука, 1981. С. 161–168.
2. Юшин В. И., ГЕЗА Н. И., ЮН ЕН ДИН. Об экспериментальной оценке возможности корреляционного накопления вибросейсмических сигналов для целей ГСЗ // Геология и геофизика. 1981. № 8. С. 123–126.
3. Юшин В. И. О результатах измерений уровня вибросейсмических сигналов и шумов при вибро-ГСЗ // Геология и геофизика. 1982. № 4. С. 89–94.
4. АЛЕКСЕЕВ А. С., РЯШЕНЦЕВ Н. П., ЧИЧЕНИН И. С. Как заглянуть внутрь планеты // Наука в СССР. 1982. № 3. С. 31–37.

5. ALEKSEEV A. S., KOVALEVSKI V. V. Powerful vibrator for deep Earth interior investigation // 60th Ann. Intern. Meeting Sos. Exploration Geophysicists, San-Francisco, Sept. 23–27, 1990.
6. Юшин В. И. Об амплитудной и энергетической эквивалентности вибрационной и импульсной сейсморазведки // Приборы и системы разведочной геофизики. 2004. № 3. С 12–17.
7. Юшин В. И. Наглядные спектральные оценки сейсмических сигналов и аппаратурных шумов // Приборы и системы разведочной геофизики. 2003. № 4. С. 34–39.
8. Юшин В. И., ГЕЗА Н. И. О помехоустойчивости корреляционного накопления вибросейсмических сигналов при широкополосном и монохроматическом излучении // Излучение и регистрация вибросейсмических сигналов. Новосибирск: Изд-во ИГиГ СО АН СССР, 1986. С. 57–65.
9. АЛЕКСЕЕВ А. С., ГЛИНСКИЙ Б. М., КОВАЛЕВСКИЙ В. В. и др. Эффект акустосейсмической индукции // Докл. РАН. 1995. Т. 346. № 5. С. 664–667.
10. ГЛИНСКИЙ Б. М., КОВАЛЕВСКИЙ В. В., ХАЙРЕТДИНОВ М. С. Взаимосвязь волновых полей мощных вибраторов с атмосферными и геодинамическими процессами // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 3. С. 431–441.

*Юшин Вячеслав Иванович – д-р техн. наук, гл. науч. сотр.
Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН;
тел.: (383) 330-39-52, 8-913-954-05-55; e-mail: vyacha@ngs.ru*

Дата поступления: 12.07.2013