



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА АБСОЛЮТНЫХ УРОВНЕЙ КОГЕРЕНТНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ С ПОМОЩЬЮ ВИБРАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В.В. Ковалевский¹, Г.Ф. Седухина¹, М.С. Хайретдинов¹, А.А. Якименко¹, Н.И. Геца², В.И. Юшин²

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 6, Россия,

e-mail: kovalevsky@sscc.ru, galya@opg.sccc.ru, marat@opg.sccc.ru, al-le@yandex.ru

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия, e-mail: lava.ru@inbox.ru, YushinVI@ipgg.nsc.ru

Описана технология, позволяющая выделять и измерять вибросейсмические колебания нанометрового уровня на фоне многократно превосходящих шумов. Технология основана на методах корреляционного и синфазного накопления вибросейсмических колебаний, излучаемых прецизионно управляемыми вибраторами. Полученные результаты имеют практическую применимость для решения задач вибро-ГСЗ и активного вибросейсмического мониторинга.

Вибросейсмическая технология, наноразмерный уровень колебаний, мониторинг, вибро-ГСЗ

EXPERIMENTAL ESTIMATION OF ABSOLUTE LEVELS OF COHERENT SEISMIC OSCILLATIONS BY MEANS OF VIBRATIONAL TECHNOLOGIES

V.V. Kovalevsky¹, G.F. Sedukhina¹, M.S. Khairtadinov¹, A.A. Yakimenko¹, N.I. Geza², V.I. Yushin²

¹Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
Acad. Lavrentjeva prosp., 6, Novosibirsk, 630090, Russia,

e-mail: kovalevsky@sscc.ru, galya@opg.sccc.ru, marat@opg.sccc.ru, al-le@yandex.ru

²Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Acad. Koptuyuga prosp., 3, Novosibirsk, 630090, Russia, e-mail: lava.ru@inbox.ru YushinVI@ipgg.nsc.ru

A technology making it possible to detect and to measure vibro-seismic oscillations on the nanometer level against the multiply exceeding noise is described. This technology is based on methods of correlated and in-phase accumulation of vibro-seismic oscillations, radiated by precisely controlled vibrators. The results obtained are applicable for solving the vibro-DSS problems and active vibro-seismic monitoring.

Vibro-seismical technology, nanometer level of oscillations, vibro-seismical monitoring, vibration DSS

Проблема выделения низкоамплитудных уровней сейсмических сигналов от вибраторов на фоне многократно превосходящих шумов постоянно актуальна как при глубинном зондировании Земли (вибро-ГСЗ), так и при активном вибросейсмическом мониторинге зон подготовки будущих природных катастроф [1]. Как известно, одна из основных целей активного мониторинга зон подготовки природных катастроф (землетрясений, вулканических процессов, оползней и др.) связана со слежением за тонкими вариациями параметров скоростей сейсмических волн, отражающих в себе меняющиеся характеристики упругости напряженно-деформированного состояния очаговых зон [2]. Обеспечить высокую разрешающую способность при этом может вибросейсмический метод активного мониторинга сейсмоопасных зон [2]. Как показано результатами численного моделирования, зоны зарождения землетрясений могут достигать горизонтальную протяженность до 200 км и более [2]. Это определяет линейные размеры зон, подлежащих мониторингу.

Относительные вариации скорости в области изменения параметров связаны с относительными вариациями амплитуд регистрируемого сигнала соотношением:

$$\frac{\delta c}{c} = 3 \cdot 10^{-3} \alpha \frac{\delta u}{u} \left(\frac{R_{V-Z}}{R_{V-S} \cdot r_0} \frac{R_{Z-S}}{r_0} \right) \left(\frac{\lambda}{r_0} \right)^2, \quad (1)$$

где α – коэффициент отражения, который для принятой модели и скоростей волн в коре и мантии лежит в пределах 0,15–1; $\frac{\delta u}{u}$ – относительные вариации амплитуд регистрируемого поля на поверхности для прямой волны; R_{V-Z} – расстояние вибратор–область изменения параметров; R_{Z-S} – расстояние от области изменений до точки регистрации (сейсмометра); R_{V-S} – расстояние вибратор–сейсмометр; r_0 – радиус области изменения параметров; λ – длина волны зондирующего сигнала.

Отсюда следует, что вариации скорости пропорциональны относительным вариациям амплитуд зарегистрированного сигнала, коэффициенту, связанному

с отношением характерных расстояний “источник–приемник”, “источник–область изменений параметров”, “область изменений параметров–приемник”, размеру области изменений параметров, а также пропорциональны квадрату отношения длины волны зондирующего сигнала к радиусу области изменения параметров и коэффициенту отражения на границе кора–мантия. Полученная оценка (1) является оценкой чувствительности метода активного вибросейсмического мониторинга с использованием гармонических сигналов и измерения вариаций волнового поля. Возможности определения предельных значений относительных вариаций скорости (1) в проблеме сейсмического мониторинга определяет чувствительность метода к меняющимся характеристикам напряженно-деформированного состояния среды в очаговых зонах.

В качестве примера можно указать, что при мониторинге на частоте $f = 6$ Гц и характерных расстояниях “источник–приемник”, “источник–область изменений параметров” 50–100 км и области изменений параметров с радиусом 1, 10 км получают следующие оценки относительных вариаций скорости и относительных вариаций амплитуд сейсмических волн. При $r_0 = 1$ км, $\delta c/c = 10^{-2}–10^{-3}$, при $r_0 = 10$ км, $\delta c/c = 10^{-5}–10^{-6}$. В обоих случаях $\delta u/u = 1,3 \cdot 10^{-7}–1,3 \cdot 10^{-8}$.

Согласно данным экспериментов по вибрационному зондированию земной коры, для выделения суточных и полусуточных периодичностей в вариациях сейсмических волновых полей, обусловленных лунно-солнечным упругим приливом, необходимо достижение инструментально-методической чувствительности к вариациям скоростей или времен пробега порядка $\delta c/c = 10^{-5}–10^{-6}$ [3]. Эти вариации необходимо измерять, располагая весьма малыми амплитудами сейсмических полей, зачастую ниже нанометровых уровней.

Для того чтобы прогнозировать возможность получения сейсмических материалов приемлемого качества при глубинном вибросейсмическом зондировании (вибро-ГСЗ) или вибромониторинге, необходимо сопоставить ожидаемые абсолютные уровни вибросейсмических колебаний и естественных шумов. В настоящей работе представлены оценки абсолютных уровней вибросейсмических колебаний на больших



Рис. 1. Вибраторы ЦВ-40 (ближний) и ЦВ-100 на Быстровском вибросейсмическом полигоне СО РАН.

удалениях, полученных в процессе многочисленных экспериментов, проведенных в разные годы с использованием вибраторов ЦВ-100 и ЦВ-40 (рис. 1). Все оценки получены путем анализа результатов когерентного корреляционного и спектрального накопления вибросигналов.

Особенности процессов излучения с помощью обоих типов источников, развивающихся в прилегающей к ним зоне, отражены на спектрально-временных функциях (СПФ) – рис. 2, а, б – зондирующих сигналов с линейной перестройкой по частоте (свип-сигналов). По длительности СПФ охватывают временной интервал зондирования 0–2500 с и диапазон частот 0–25 Гц. Как видно, особенности излучения характеризуются наличием резонансных частот и появлением высших и низших гармоник. Учет отмеченных особенностей излучения позволяет в дальнейшем оптимизировать процесс обработки данных.

Технология регистрации и измерения параметров сверхслабых уровней сейсмических волн основывается на использовании двух принципов построения аппаратных средств: 1) использования общей шины для дистанционного сбора данных от пространственно разнесенных сейсмодатчиков [4]; 2) использования на-

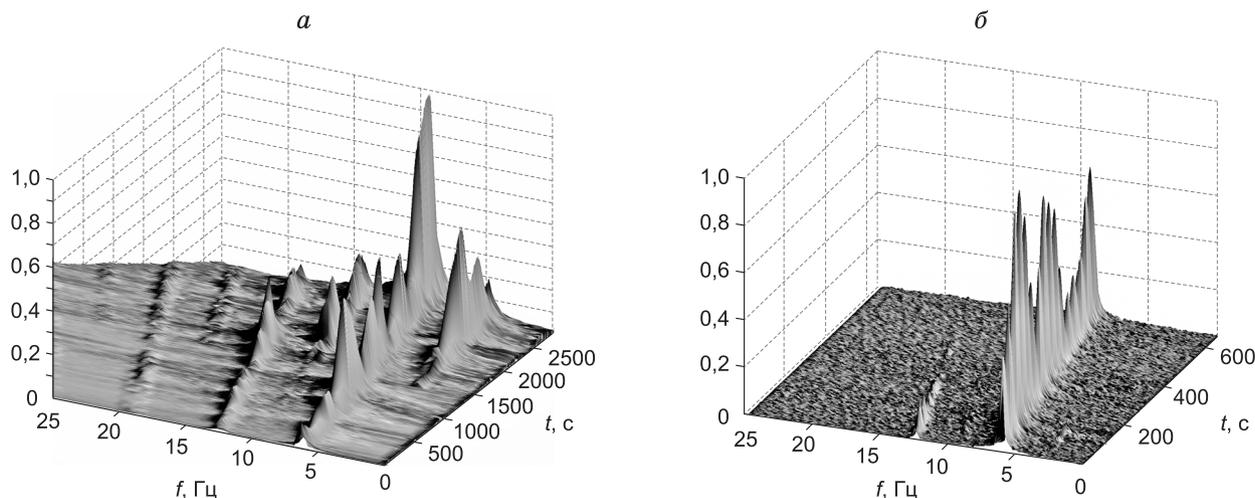


Рис. 2. Спектрально-временные функции зондирующих сигналов:

а – вибратора ЦВ-40, б – вибратора ЦВ-100.

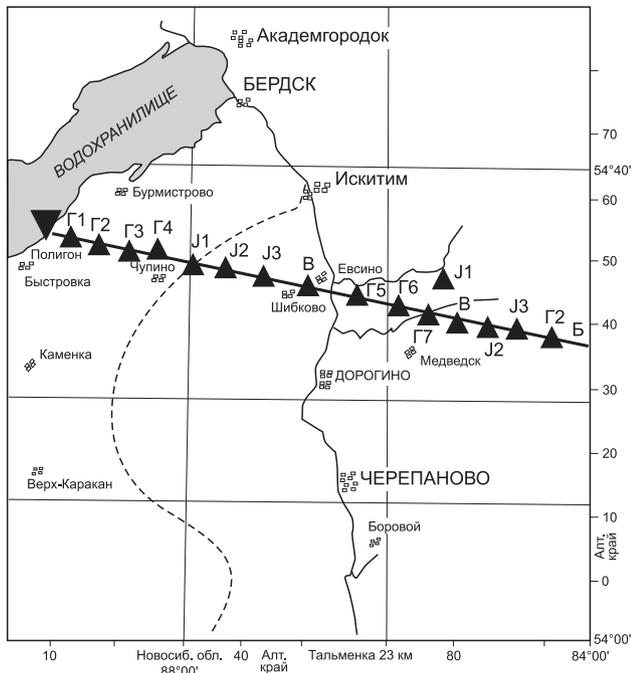


Рис. 3. Схема профильной регистрации ЦВ-100.

бора пространственно-разнесенных компактных автономных сейсмостанций со своими датчиками. Этот вариант регистрации осуществлялся ранее с помощью японских автономных станций с применением трехкомпонентных сейсмоприемников СК1П [5]. В настоящее время он реализуется с помощью автономных сейсмостанций “Байкал”. Достоинством данной технологии является возможность выбора базы и геометрии расстановки сейсмодатчиков без ограничений. В соответствии с обоими вариантами регистрации были проведены эксперименты в диапазоне дальностей “источник–приемник” 0–500 км. Целью 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.

В основе обработки данных лежит алгоритм корреляционной свертки вида

$$r(m) = \frac{2}{N-m} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot s_{n-m}, \text{ где } m = 1, \dots, M, \\ n = 0, \dots, N-1. \quad (2)$$

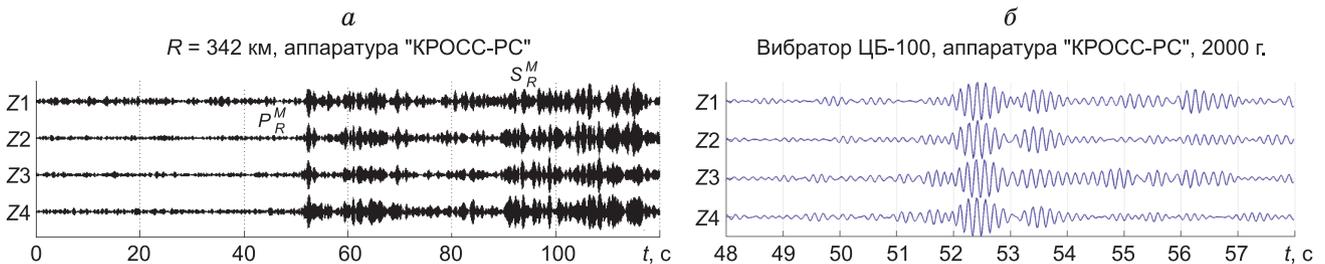


Рис. 4. Вибрационные сейсмограммы (коррелограммы) от вибратора ЦВ-100 на дальности 342 км:

а – в широком окне, охватывающем времена прихода всех волн; б – в узком окне, охватывающем только волны первых вступлений.

Здесь M – число дискретных отсчетов вибрационной сейсмограммы; $S(t_n)$ – опорный сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) вида $S(t) = S(t) = a(t) \cos(2\pi f_0 t + \pi\beta t^2)$, параметрами которого являются $a(t)$ – огибающая, f_0 – начальная частота развертки, β – скорость развертки по частоте, равная $\beta = (f_{\max} - f_0)/T$, где f_{\max} – максимальная частота, T – длительность развертки. Использование соотношения (2) позволяет получить результат свертки в “амплитудном” уровне, т. е. представить вибрационную сейсмограмму в масштабе фактических движений почвы [6]. Хотя вибросигналы в пунктах приема лежат ниже уровня окружающего шума, операция взаимной корреляции с сигналом вибратора позволяет восстановить их истинные амплитуды.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГИСТРАЦИИ И ИЗМЕРЕНИЯ АБСОЛЮТНЫХ УРОВНЕЙ КОЛЕБАНИЙ ОТ ВИБРАТОРА ЦВ-100

Схема расположения точек регистрации приведена на рис. 3.

Методика проведения эксперимента состояла в том, что три из четырех японских сейсмостанций с двумя перестановками обеспечили одновременную регистрацию в шести пунктах наблюдения (на удалениях от 22 до 75 км), а четвертая была вынесена в пункт наблюдения на удалении 320 км. Дополнительная точка регистрации располагалась на удалении 342 км, где использовалась 15-канальная аппаратура регистрации “КРОСС” [4].

Вибратор ЦВ-100 излучал в среду сигналы двух типов: свип-сигнал с линейной разверткой частоты от 5,47 до 8,5 Гц в течение 43 мин; последовательность монохроматических сигналов на частотах 6,0; 6,25; 6,5; 6,75; 7,0 и 7,25 Гц длительностью 600 с каждый. В качестве примера на рис. 4 показан пример коррелограммы (вибрационной сейсмограммы), полученной на удалении 342 км от вибратора ЦВ-100 с помощью аппаратуры “КРОСС-РС”, в основу которой была положена топология сбора данных “общая шина”. Регистрация осуществлялась в полосе частот 5,5–8,5 Гц с помощью пяти последовательно расположенных с шагом 200 м датчиков СК1-П (компоненты Z1–Z5). В качестве волн первых вступлений на 52,5 с (см. рис. 4, б) уверенно выделяются волны P_R , преломленные на границе Мохоровичича, которым соответствует скорость распространения 8,0 км/с. Начиная с 89 с уверенно регистрируется группа S-волн (S_R).

Таблица 1

Амплитуды колебательной скорости почвы
на разных удалениях от вибратора ЦВ-100

Пункты	Дальность, км	X, нм/с	Y, нм/с	Z, нм/с
J1	22,4	62	68,8	38,5
J2	27,4	42,6	46,7	26,2
J3	34	15,4	13,4	7,24
J4	60	11,4	10,6	7,29
J5	72	4,8	4,6	3,0
J6	75,5	5,3	4,4	6,6
J300	320	0,37	0,3	0,17

В табл. 1 представлены сводные результаты измерений максимальных амплитуд коррелограмм вибросигналов вибратора ЦВ-100, а на рис. 5 эти же результаты выполнены графически в квантах цифровой записи (1 квант = 0,5 нм/с). Удовлетворительную аппроксимацию изменения амплитуд дала в нашем случае аналитическая зависимость относительной амплитуды колебания от безразмерной дальности r_0/r :

$A(r) = A_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^\Lambda$, где r_0 – начальная дальность (в данном случае $r_0 = 22,5$ км), A_0 – фактическая амплитуда сигнала на начальной дальности; $\Lambda = 1,88$.

Из приведенных данных следует, что предельные уровни колебаний на больших удалениях от вибратора составляют доли нанометров. Достигнутые результаты их измерения свидетельствуют о высокой чувствительности созданной технологии регистрации и измерения вибросейсмических колебаний нанометрового уровня.

**РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГИСТРАЦИИ
И ИЗМЕРЕНИЯ АБСОЛЮТНЫХ УРОВНЕЙ
КОЛЕБАНИЙ ОТ ВИБРАТОРА ЦВ-40**

Регистрация и измерение уровней колебаний от этого источника осуществлялись в диапазоне дальностей 0–342 км на удалениях 0,59; 0,98; 6; 39,5; 50; 93; 342 км от источника. Вибратор излучал линейные свип-сигналы в частотных диапазонах 6,25–9,57; 7,91–11,23 и 6,25–11,23 Гц с временами развертки по частоте 47 мин 30 с и 72 мин соответственно. Серия монохроматических сигналов регистрировалась на частотах 6,0; 6,25; 6,5; 6,75; 8,0 и 8,5 Гц по 600 с каждый.

Для регистрации использовались автономные сейсмостанции “Байкал” и сейсмодатчики СК1-П, СМЕ-3011 (молекулярно-электронный датчик). Технология регистрации и измерения абсолютных уровней волн была та же, что и по отношению к вибратору ЦВ-100. В качестве примера на рис. 6 приведены вибрационные сейсмограммы (по компонентам Z), полученные на удалениях 6, 36, 50, 87 км от вибратора. Высокое соотношение амплитуд волн P и S к уровню шума (более 20) позволяет с высокой точностью измерять абсолютные уровни волн. Следует заметить, что в верхней части рисунка, соответствующего удалению 6 км, начиная с 15 с видны акустические

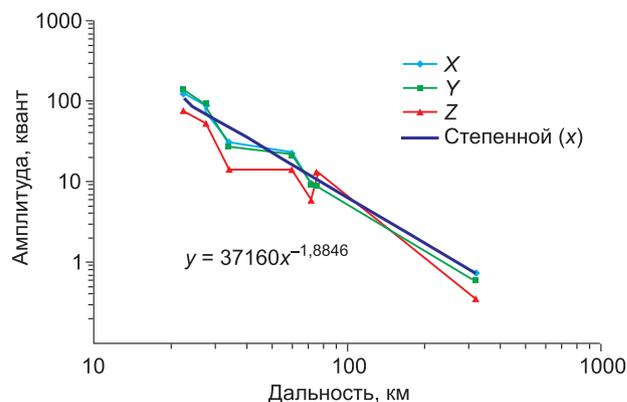


Рис. 5. График максимальных амплитуд виброграмм в зависимости от расстояния от источника ЦВ-100 в диапазоне дальностей 22–320 км.

волны. Сейсмоакустические эффекты от вибраторов рассматривались авторами ранее [5].

В попытке определения предельной дальности сейсмозондирования вибратором 40-тонного класса был проведен эксперимент на удалении около 342 км (п. Бор-Форпост). Регистрация колебаний от вибратора ЦВ-40 осуществлялась сейсмостанциями “Байкал” с помощью крестовой расстановки, схематически представленной на рис. 7. Одна из сторон “креста” была ориентирована на вибратор с азимутом около 42°. Расстановка содержала 17 трехкомпонентных датчиков с шагом 200 м. Датчики 1–16 – СК1-П, датчик 17 – СМЕ-3011.

Полученные в этом эксперименте сейсмограммы по компонентам Z приведены на рис. 8. Особенность этих сейсмограмм состоит в том, что они представляют собой результат синфазного суммирования (“штабелирования”) коррелограмм $r_i(m)$, полученных в L повторных сеансах, согласно

$$\bar{r}(m) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L r_i(m), \quad (3)$$

полоса частот составляла 7,91–11,23 Гц, $L = 6$, что позволило увеличить соотношение амплитуд волн к среднеквадратическому значению шума более чем в 2 раза.

Для сопоставления абсолютных уровней колебаний от вибратора ЦВ-40 в широкополосном и гармоническом режимах зондирования для дальности 342 км была выполнена спектральная обработка данных в разных гармонических режимах излучения. В результате обработки были вычислены амплитудные спектры сейсмических колебаний со спектральным разрешением 0,001 Гц. Для иллюстрации помехоустойчивости накопления гармонических колебаний на фоне многократно превосходящих шумов на рис. 9 приведены примеры амплитудных спектров, полученных по компонентам X, Y, Z, соответственно гармоническому режиму зондирования на частоте 10,5 Гц. Для сравнения представлены результаты накопления с использованием сейсмодатчиков СК1-П и СМЕ-3011. Как видно, соотношение сигнал/шум достигает 10 и более.

Соответствующие гистограммы абсолютных амплитуд колебательной скорости по трем компонентам представлены на рис. 10. Наблюдаются ярко выра-

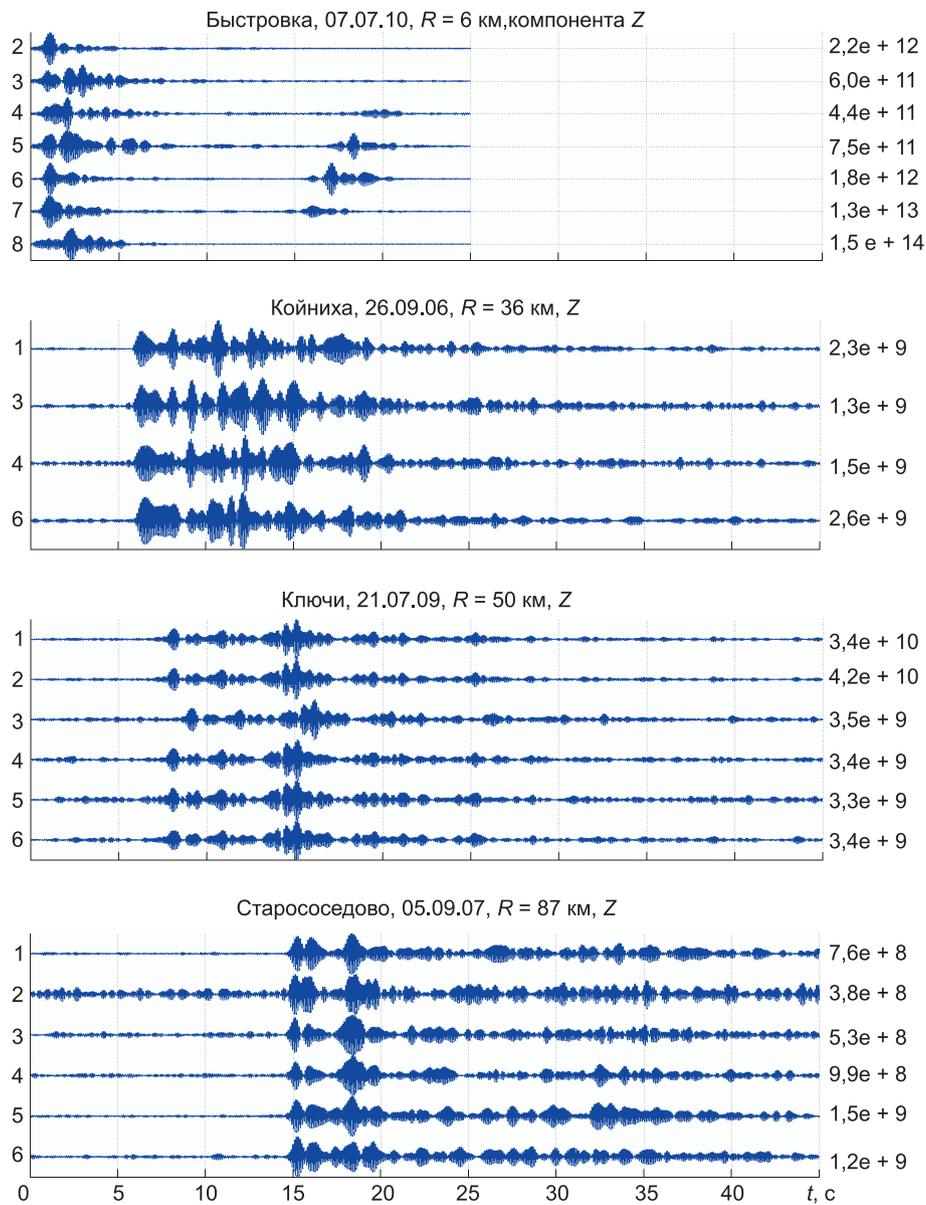


Рис. 6. Вибрационные сейсмограммы, полученные от вибратора ЦВ-40 на удалениях 6, 36, 50, 87 км.

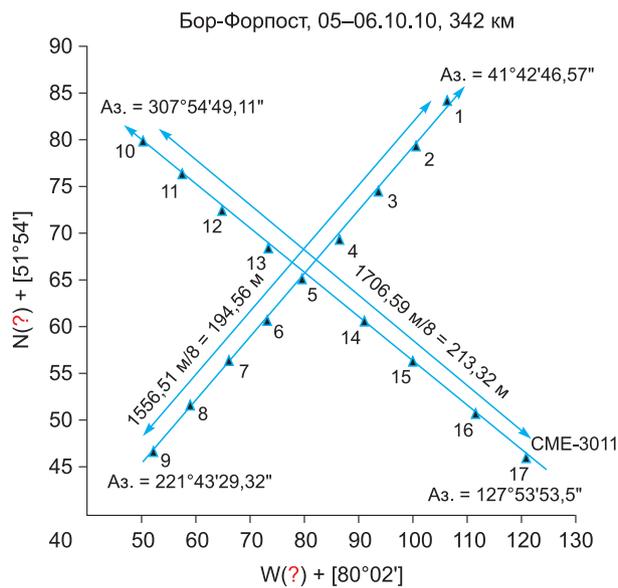


Рис. 7. Схема расстановки датчиков в пункте Бор-Форпост.
Удаление от вибратора ЦВ-40 342 км. Датчики 1–16 – СК1-П, датчик 17 – типа СМЕ-3011.

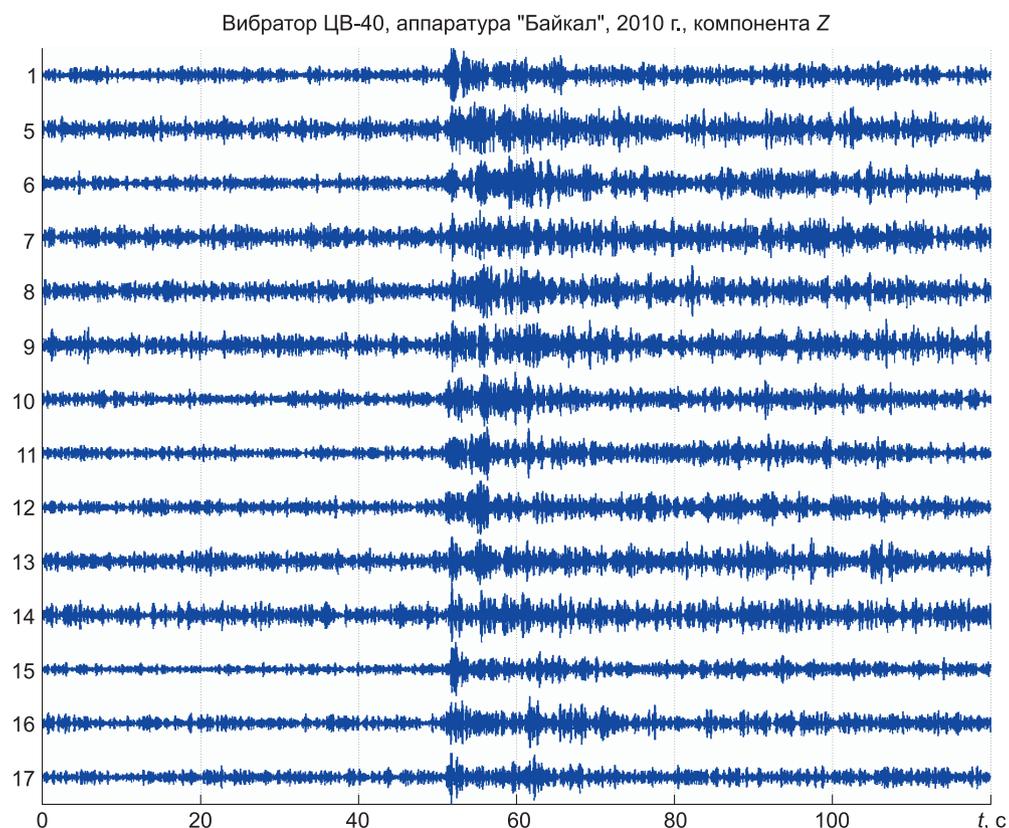


Рис. 8. Вибрационные сейсмограммы, полученные от вибратора ЦВ-40 на удалении 342 км (п. Бор-Форпост) с помощью сейсмостанций “Байкал”.

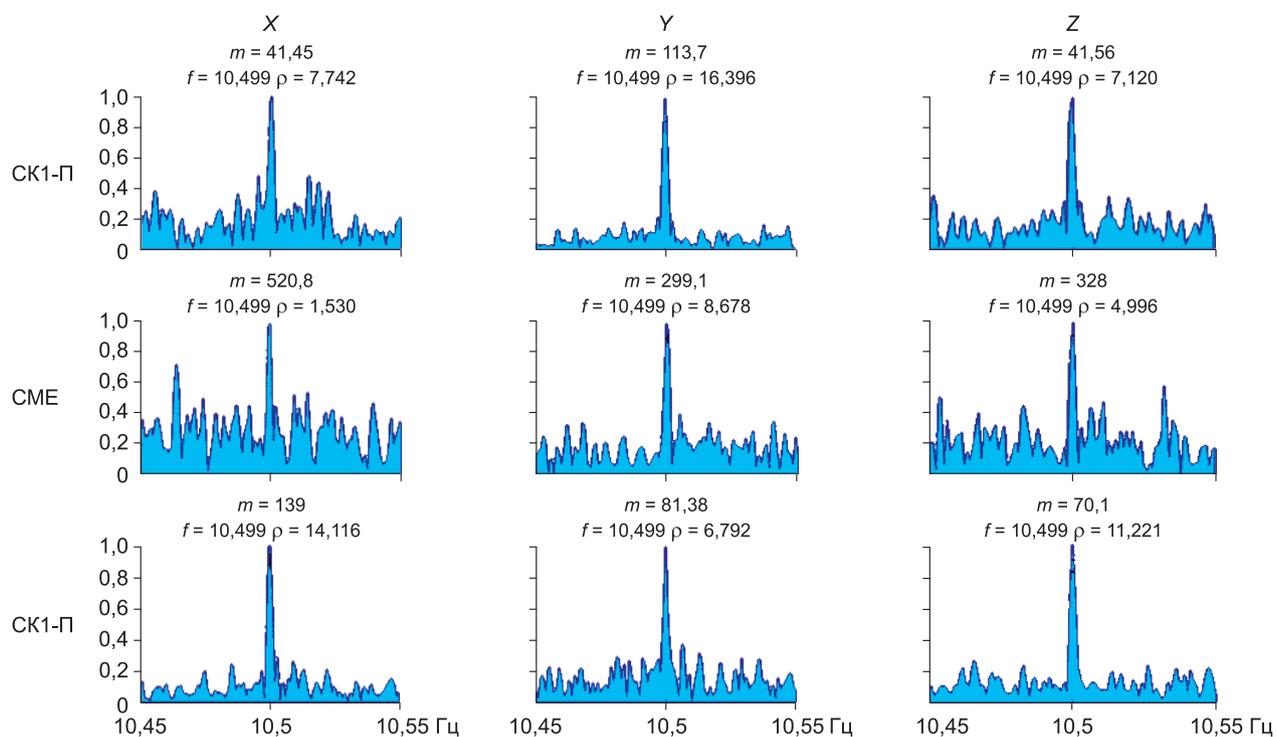


Рис. 9. Пример результатов накопления гармонического сигнала на частоте 10,5 Гц от вибратора ЦВ-40 на удалении 342 км от источника.

Разрешение по частоте – 0,001 Гц. Типы используемых датчиков показаны слева от спектрограмм.

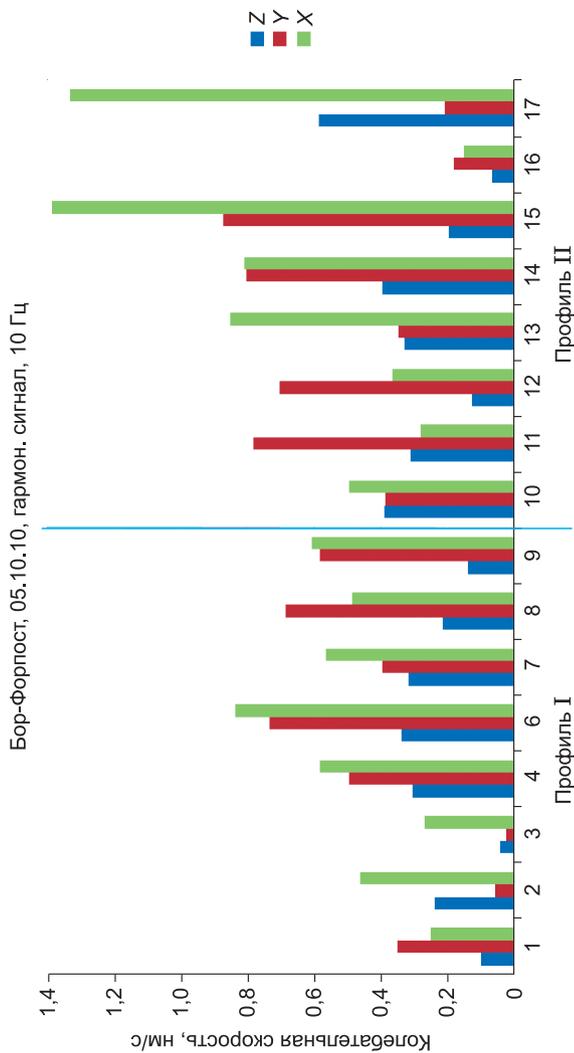


Рис. 10. Уровни колебательной скорости, полученные по компонентам X, Y, Z от вибратора ЦВ-40 на частоте 10 Гц на удалении 342 км от источника.

Таблица 2

№	Точка	Расстояние, км	Амплитуда колебательной скорости, нм/с																			
			ЦВ-40 моно 10,5 Гц			ЦВ-40 моно 10 Гц			ЦВ-40 свип 7,91–11,23 Гц			ЦВ-40 моно 10,5 Гц			ЦВ-40 моно 10 Гц			ЦВ-40 свип 7,91–11,23 Гц				
			x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z		
1	Быстровка	0,6	4,6·10 ⁴	2,1·10 ⁴	3,5·10 ⁴	4,2·10 ⁴	1,1·10 ⁴	1,1·10 ⁴	2,9·10 ⁴	2,9·10 ⁴	2,6·10 ⁵	8,8·10 ⁴	2,0·10 ⁵	7,0·10 ²	3,2·10 ²	5,3·10 ²	6,6·10 ²	1,7·10 ²	4,6·10 ²	4,3·10 ³	1,5·10 ³	3,3·10 ³
3	То же	1,0	1,7·10 ⁴	3,6·10 ³	1,1·10 ⁴	2,9·10 ⁴	5,3·10 ³	1,2·10 ⁴	1,4·10 ⁵	4,3·10 ⁴	2,8·10 ⁴	4,3·10 ⁴	2,8·10 ⁴	2,5·10 ²	5,4·10	1,7·10 ²	4,7·10 ²	8,4·10	1,8·10 ²	2,4·10 ³	7,2·10 ²	4,7·10 ²
4	»	6,0	1,2·10 ²	1,3·10 ²	2,7·10 ²	2,1·10 ²	9,2·10	2,6·10 ²	4,7·10 ²	2,2·10 ²	9,8·10 ²	2,2·10 ²	9,8·10 ²	1,8	2,0	4,1	3,3	1,5	4,2	7,9	3,7	1,6·10
5	Койниха	39,5	3,8·10	3,8·10	1,1·10	2,7·10	2,5·10	1,6·10	3,0·10	4,0·10	3,3·10	4,0·10	3,3·10	5,8·10 ⁻¹	5,8·10 ⁻¹	1,7·10 ⁻¹	4,3·10 ⁻¹	4,0·10 ⁻¹	2,5·10 ⁻¹	5,0·10 ⁻¹	6,6·10 ⁻¹	5,5·10 ⁻¹
6	Ключи	50,0	9,2	5,7	7,5	2,0·10	7,5	6,5	2,7·10	2,5·10	2,4·10	2,5·10	2,4·10	1,4·10 ⁻¹	8,6·10 ⁻²	1,1·10 ⁻¹	3,2·10 ⁻¹	1,2·10 ⁻¹	1,0·10 ⁻¹	4,5·10 ⁻¹	4,2·10 ⁻¹	3,9·10 ⁻¹
7	Старо-Сосе- дово	93,0	1,9·10	1,3·10	8,0	3,5·10	1,8·10	9,9	2,9·10	3,1·10	2,1·10	3,1·10	2,1·10	2,9·10 ⁻¹	1,9·10 ⁻¹	1,2·10 ⁻¹	5,5·10 ⁻¹	2,8·10 ⁻¹	1,6·10 ⁻¹	4,8·10 ⁻¹	5,2·10 ⁻¹	3,4·10 ⁻¹
8	Бор-Форпост	342,0	8,0·10 ⁻¹	7,0·10 ⁻¹	5,0·10 ⁻¹	8,0·10 ⁻¹	8,5·10 ⁻¹	6,0·10 ⁻¹	8,3·10 ⁻¹	9,0·10 ⁻¹	8,3·10 ⁻¹	9,0·10 ⁻¹	8,3·10 ⁻¹	1,2·10 ⁻²	1,1·10 ⁻²	7,6·10 ⁻³	1,3·10 ⁻²	1,4·10 ⁻²	9,6·10 ⁻³	1,4·10 ⁻²	1,5·10 ⁻²	1,4·10 ⁻²

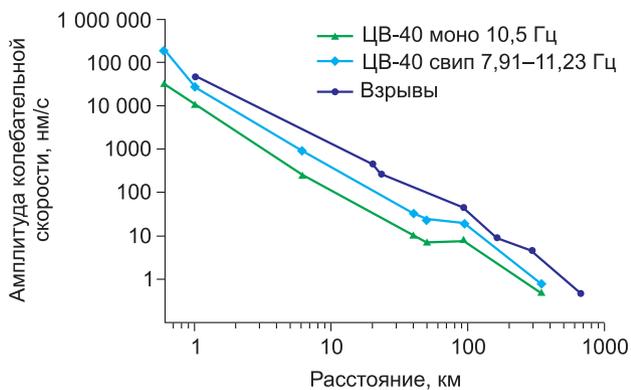


Рис. 11. Абсолютные уровни колебательной скорости сейсмических волн от вибратора ЦВ-40 и взрыва с тротиловым эквивалентом в 1 т.

женные вариации уровней колебаний вдоль обеих регистрирующих профилей (см. рис. 7), достигающие одного порядка внутри каждой из компонент. Наиболее высокие значения уровней колебаний проявляются на компонентах Z и Y. Здесь превышение над уровнями колебаний по X, азимутально ориентированных на источник, составляет в среднем 2–3 раза.

По материалам обработки данных широкополосного и монохроматического режимов зондирования в табл. 2 сведены результаты расчетов абсолютных амплитуд колебательной скорости и соответствующие им амплитуды смещений. Эти данные касаются монохроматического режима зондирования на частотах 10 и 10,5 Гц и широкополосного в диапазоне частот 7,91–11,23 Гц. В табл. 2 приведены названия пунктов регистрации и соответствующие им расстояния от вибратора, уровни амплитуд сейсмических волн в широкополосном режиме зондирования и амплитуд колебаний в монохроматическом режиме. Табличные данные представлены в виде графиков зависимости абсолютных амплитуд колебаний от расстояния (рис. 11). Здесь же нанесены абсолютные значения колебательной скорости, полученные от взрыва с тротиловым эквивалентом в 1 т в диапазоне дальностей 1–600 км [7].

При построении графика для монохроматического режима зондирования учитывались максимальные значения амплитуд колебательной скорости. Покомпонентные графики затухания сейсмических волн по расстоянию представлены на рис. 12. Для сравнения на них наложен теоретический экспоненциальный график затухания, сравнение с которым свидетельствует, что закон ослабления по расстоянию реальных сигналов с высоким приближением соответствует теоретическому.

Из анализа полученных данных вытекает следующее:

1. По своему энергетическому эквиваленту параметры вибросейсмического волнового поля, порождаемого мощными вибраторами ЦВ-100, ЦВ-40 в диапазоне дальностей 1–350 км, приближаются к соответствующим энергетическим параметрам сейсмического поля от взрыва с тротиловым эквивалентом в 1 т.

2. Вплоть до телесеismicких расстояний, соответствующих первым сотням километров, затухание

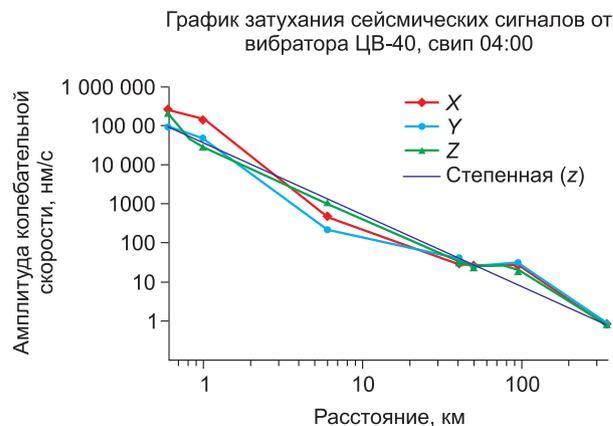


Рис. 12. График затухания сейсмических волн от вибратора ЦВ-40 по расстоянию для компонент X, Y, Z.

сейсмических колебаний с достаточно высоким приближением описывается экспоненциальным законом. При этом графики затухания сейсмических колебаний по компонентам X, Y, Z идентичны

3. Разброс значений уровней колебаний, регистрируемых в монохроматическом режиме зондирования в пределах площади регистрации 1550 м на 1700 м, удаленной от вибратора на 342 км, достигает одного порядка, что вполне объяснимо явлением интерференции волн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В интересах решения задач вибрационного глубинного зондирования Земли на предельных расстояниях – сотен километров, а также создания технологии высокочувствительного активного вибросейсмического мониторинга геодинамических процессов в зонах назревания природных катастроф разработана и успешно апробирована технология вибросейсмической нанометрии. Технология позволяет выделять и измерять вибросейсмические колебания нанометрового уровня на фоне многократно превосходящих шумов. Разработанная технология основана на методах корреляционного и синфазного накопления вибросейсмических колебаний, излучаемых вибраторами с высокометрологическими параметрами по частоте, фазе и амплитуде колебаний. Используются варианты регистрации вибросейсмических сигналов с помощью автономных сейсмических станций “Байкал”. Технология была успешно испытана в ряде экспериментов по ВПЗ в диапазоне дальностей 0–450 км.

2. По своему энергетическому эквиваленту параметры вибросейсмического волнового поля, порождаемого мощными вибраторами ЦВ-100, ЦВ-40 в диапазоне дальностей 1–350 км, приближаются к соответствующим энергетическим параметрам сейсмического поля от взрыва с тротиловым эквивалентом в 1 т.

3. Полученные результаты экспериментальных исследований могут применяться при решении задач вибро-ГСЗ и активного вибросейсмического мониторинга.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранты № 09-07-12075-офи-м, 10-07-00387-а, № 11-07-10000-к.

Литература

1. **Активная** сейсмология с мощными вибрационными источниками / А.С. Алексеев, Н.И. Геза, Б.М. Глинский, В.В. Ковалевский, М.С. Хайретдинов, В.И. Юшин и др. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал “Гео”, 2004. 386 с.
2. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Имомназаров Х.Х., Ковалевский В.В., Собисевич Л.Е., Хайретдинов М.С., Цибульчик Г.М. Мониторинг геометрии и физических свойств “поверхностной” и “очаговой” дилатансных зон методом вибросейсмического просвечивания сейсмоопасных участков земной коры // Изменения окружающей среды и климата. Т. 1: Сейсмические процессы и катастрофы. М.: ИФЗ РАН, 2008. С. 179–222.
3. Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С. Взаимосвязь полей мощных вибраторов с атмосферными и геодинамическими процессами // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 3. С. 431–441.
4. Григорюк А.П., Родионов Ю.И., Хайретдинов М.С. Система регистрации и обработки вибросейсмосигналов на базе персонального компьютера // Тр. ВЦ СО РАН, Сер. Мат. модел. в геофизике. Новосибирск, 1994. Вып. 3. С. 130–137.
5. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Еманов А.Ф., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С., Юшин В.И., Касахара Д., Сато Т., Мочизуки К. и др. Изучение структуры Алтае-Саянского региона с использованием вибросейсмических мощных источников // Тр. ВЦ СО РАН, Сер. Мат. модел. в геофизике. Новосибирск, 1996. Вып. 4. С. 3–17.
6. Юшин В.И. Об амплитудной и энергетической эквивалентности вибрационной и импульсной сейморазведки // Приборы и системы разведочной геофизики. 2004. № 3. С. 12–17.
7. Рябой В.З., Шнеерсон М.Б. Абсолютные уровни сигналов и невзрывные источники колебаний при глубинных сейсмических исследованиях // Проблемы вибрационного просвечивания Земли. М.: Наука, 1977. С. 86–90.