

ПРИМЕНЕНИЕ ДАТЧИКОВ С РАСШИРЕННЫМИ ЧАСТОТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ВЗРЫВОВ

А.Н. Беседина, Н.В. Кабыченко

В работе проводится анализ сейсмических событий различного масштаба для апробации метода численной коррекции датчиков. Результаты регистрации промышленных взрывов подтвердили возможность использования геофонов типа GS-20DX при проведении сейсмических наблюдений в платформенных условиях в диапазоне частот 4–14 Гц. Ошибка определения магнитуд по записям короткопериодных сейсмометров с расширенными частотными характеристиками, используемых для мониторинга землетрясений, соответствует точности оценок магнитуд в каталогах.

Введение

Сейсмологический мониторинг является общепризнанным инструментом для контроля изменений напряженно-деформированного состояния среды, геодинамической ситуации и выявления на ранних стадиях развития опасных тенденций. В зависимости от поставленных физических задач используются первичные преобразователи различных типов, соответствующие необходимому диапазону частот. Зачастую при сейсмическом мониторинге на территории России (даже тектонически активных районов) приходится ограничиваться только короткопериодными датчиками, которые в состоянии решать лишь ограниченный круг задач в средней полосе частот. В силу этого актуальной задачей является расширение частотного диапазона имеющихся датчиков. Например, установка короткопериодных датчиков, с расширенными в область низких частот характеристиками, позволит зарегистрировать цуги длиннопериодных поверхностных волн от сильных землетрясений. А при проведении сейсмического мониторинга локальных участков земной коры наблюдательные сети можно уплотнить (или полностью заменить) за счет использования дешевых геофонов с расширенными частотными характеристиками.

При расчетах различных типов магнитуд приняты стандартные методы измерения амплитуд и периодов цифровых данных [Взрывы..., 2013]. В данной работе рассмотрим магнитуды по объемной Р-волне и по поверхностной волне, которые

в практике сейсмологических наблюдений определяют двумя способами: оценивают амплитуды движения почвы на вертикальной компоненте на короткопериодном канале (фильтре) или рассчитывают скорость движения, ассоциируемую с максимальной амплитудой колебания в Р-волне (или поверхностной волне при определении M_S), по замерам у волн со значительно более широким диапазоном периодов. Например, для магнитуды по объемной Р-волне используются следующие соотношения [Взрывы..., 2013]:

$$m_b = \lg(A/T) + Q(\Delta, h) - 3.0, \quad (1)$$

или

$$m_B = \lg(V_{\max}/2\pi) + Q(\Delta, h) - 3.0, \quad (2)$$

где A – амплитуда максимального колебания в объемной волне, нм; T – период максимального колебания в с ($T < 3$ с для (1), $0.2 \text{ с} < T < 30$ с для (2)); V_{\max} – скорость смещения грунта, ассоциируемая с максимальной амплитудой колебания в Р-волне, записанного по вертикальной компоненте в нм/с; $Q(\Delta, h)$ – калибровочная функция; Δ – эпицентральное расстояние; h – фокальная глубина, км. При использовании соотношения (2) измерения должны проводиться современными широкополосными сейсмографами. При этом значения магнитуд наиболее часто рассчитываются по максимальной амплитуде скорости, поскольку это измерение проще для выполнения, чем определение соотношения (A/T) на узкополосном сейсмометре или по записи смещения [Взрывы..., 2013]. Поэтому в данной работе проводится оценка максимальной амплитуды колебаний V_{\max} в продольной и поверхностной волнах для сопоставления результатов регистрации короткопериодных датчиков с расширенными характеристиками и измерений широкополосных сейсмометров. В качестве апробации метода коррекции, который позволяет расширить частотную характеристику измерительного канала, выполнен анализ сейсмограмм промышленных взрывов, зарегистрированных высокочастотными геофонами.

Методы и данные

Наиболее простым и удобным способом расширения частотной характеристики датчика является применение обратного фильтра [Navskov, Alguacil, 2002; Scherbaum, 1996]. Коррекция обратным фильтром является универсальным средством уменьшения нижней граничной частоты датчика. При этом серьезной проблемой при реализации на практике обратного фильтра является наличие полюса в его передаточной функции на нулевой частоте. По этой причине величину нижней граничной частоты приходится ограничивать для обеспечения устойчивости корректирующего фильтра. Различные схемы представлены в [Карандеев, Гик, 1959; Гик, Карандеев, 1962; Беседина, 2014].

В данной работе общее уравнение корректирующей схемы рассматривалось в следующем виде [Беседина, 2014]:

$$F_k(s) = \frac{s^2 + 2 \cdot h \cdot \omega_0 \cdot s + \omega_0^2}{s^2 + 2 \cdot h \cdot \omega_1 \cdot s + \omega_1^2}, \quad (3)$$

где ω_0 – собственная частота сейсмического датчика, которую требуется понизить до $\omega_1 < \omega_0$, h – затухание сейсмометра, s – комплексная переменная. Однако построение корректирующих фильтров с помощью программной фильтрации не всег-

да возможно. Например, когда уровень шумов за пределами штатного диапазона измерительного прибора превышает значение сигнала. В этом случае невозможно восстановить в сигнале частоты, которые были полностью подавлены, а при восстановлении частотных составляющих, ослабленных до уровня шумов, одновременно происходит значительное усиление дисперсии шумов, в которых полезный сигнал может полностью затеряться [Давыдов, 2007].

Оценка границ применимости измерительных каналов для сейсмометров GS-20DX (собственная частота 10 Гц) и СМ-3КВ (собственная частота 0,5 Гц), содержащих собственно сейсмические датчики, усилители и корректирующие фильтры, расширяющие частотные характеристики каналов в область низких частот, показала возможность регистрации колебаний на частотах от 1–2 до 100–200 Гц геофоном GS-20DX с корректирующим устройством. К сигналам, попадающим в этот частотной диапазон, относятся сейсмические волны от промышленных взрывов и группа объемных волн от региональных землетрясений. Измерительный канал СМ-3КВ с расширенной частотной характеристикой способен регистрировать цуги поверхностных волн от сильных удаленных землетрясений, которые раньше оставались за пределами его возможностей [Беседина и др., 2011].

Для апробации метода численной коррекции в качестве данных привлекались результаты мониторинга двумя приборами: высокочастотным геофоном GS-20DX и короткопериодным сейсмометром СМ-3КВ. Измерения проводились на территории геофизической обсерватории (ГФО) ИДГ РАН «Михнево», где ведется постоянный сейсмический мониторинг малоапертурной сейсмической антенной круговой конфигурации, оборудованной датчиками СМ-3КВ (рис. 1) [Санина и др., 2008]. В центральной точке группы в шахте на глубине 20 м установлен трехкомпонентный широкополосный сейсмометр СМ-3-Д. Дополнительно измерительные точки 0 и 2.3 (рис. 1) были оснащены вертикальными геофонами GS-20DX. Параметры используемых датчиков приведены в табл. 1. Удаленность ГФО «Михнево»

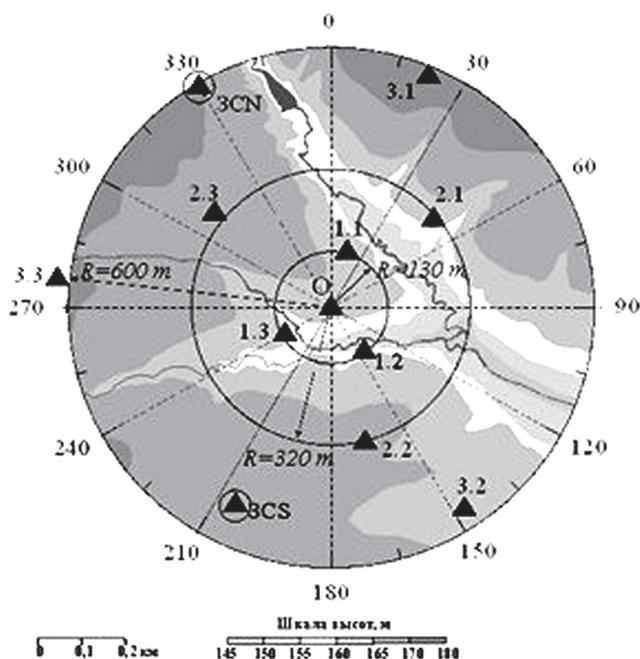


Рис. 1. Конфигурация малоапертурной сейсмической группы «Михнево». Треугольниками обозначены места расположения сейсмоприемников, черными кружками выделены трехкомпонентные приборы [Черных, 2011]

от крупных населенных пунктов, автомобильных дорог и железнодорожных магистралей обеспечивает сравнительно слабое влияние шумов техногенной природы на запись сейсмических сигналов. Данный аспект является важным фактором при проведении коррекции.

Таблица 1

	GS-20DX	СМ-3КВ	СМ-3-Д
Чувствительность, В/м/с	20	135	2000
Рабочий диапазон частот, Гц	10–250	0.5–50	0.01–50

Записи промышленных взрывов за период с 25.11.2011 по 9.12.2011 гг. и с 8.07.2013 по 16.07.2013 гг. привлекались для обработки записей и сравнения возможностей регистрации датчика GS-20DX с расширенной частотной характеристикой и сейсмометра СМ-3КВ. За это время сейсмическая антенна зарегистрировала 64 сейсмических события: взрывы на карьерах с эпицентрными расстояниями 58–735 км.

Таблица 2

№	Дата	Время в очаге GMT	M_w	Координаты	
1	05.01.2013	08:58:31.5	7.5	55.69	134.97
2	08.02.2013	15:26:53.8	7.0	-10.72	165.92
3	06.04.2013	04:42:41.8	7.0	-3.33	138.49
4	19.04.2013	03:06:04.7	7.3	46.00	150.92
5	23.05.2013	17:19:13.0	7.4	-23.19	-176.88
6	07.07.2013	18:35:42.4	7.3	-4.10	153.98
7	15.07.2013	14:04:07.1	7.3	-61.05	-23.51
8	30.08.2013	16:25:09.5	7.0	51.44	175.12
9	15.10.2013	00:12:50.0	7.1	9.84	123.96
10	25.10.2013	17:10:25.3	7.1	37.17	144.66

Применение метода коррекции к короткопериодному датчику СМ-3КВ рассматривалось на записях сильных землетрясений, произошедших в 2013 году, с магнитудой $M_w > 7$ согласно каталогу Global CMT Catalog. В выборку вошли события из табл. 2.

Полученные результаты

Расширение диапазона регистрации геофона рассматривалось на сейсмограммах промышленных взрывов. Проводилась регистрация сигналов, последующая обработка записей и сравнение возможностей регистрации датчика GS-20DX с расширенной частотной характеристикой и сейсмометров СМ-3КВ. Частотная характери-

стика геофонов расширялась в области низких частот с помощью корректирующего фильтра до 1, 2 или 3 Гц в зависимости от интенсивности регистрируемого сигнала. Ограничение в значении нижней граничной частоты геофона при проведении коррекции приводит к тому, что поверхностные волны, которые характеризуются более низкими частотами, чем объемные, не всегда удается выделить на зарегистрированной сейсмограмме. Обработка данных регистрации промышленных взрывов на ГФО «Михнево», приведенная в работе [Черных, 2011], показала, что частоты первых вступлений объемных волн лежат, в основном, в диапазоне частот 4–9 Гц. Исходя из этого, граничную частоту коррекции примем равной 3 Гц. Это позволит использовать одни и те же параметры в корректирующей схеме для всех взрывов без потери информации о вступлении объемных волн. На рис. 2 представлены сейсмограммы, отфильтрованные в полосе частот 5–9 Гц, и спектры от взрыва 01.12.2011 г. на Новогуровском карьере, зарегистрированные сейсмометром СМ-3КВ, геофоном GS-20DX и геофоном GS-20DX с частотной характеристикой, расширенной до 3 Гц. Восстановленный спектр сигнала, зарегистрированного гео-

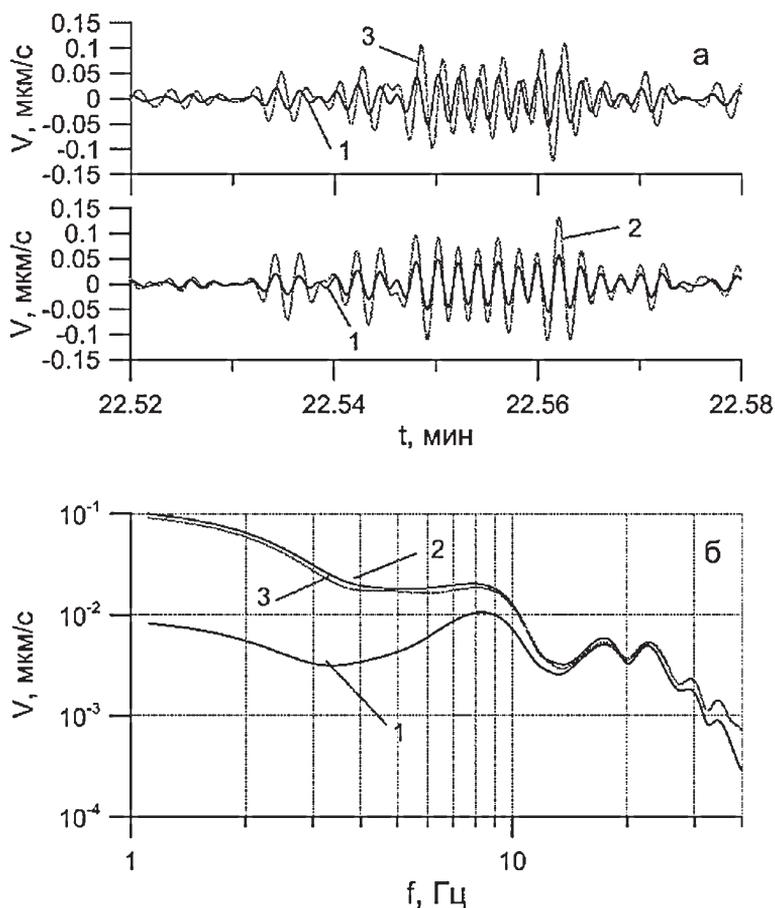


Рис. 2. Сигналы в частотном диапазоне 5–9 Гц (а) и спектры (б) от взрыва 01.12.2011 г. на Новогуровском карьере, зарегистрированные геофоном GS-20DX (1), сейсмоприемником СМ-3КВ (2), геофоном GS-20DX с расширенной частотной характеристикой до 3 Гц (3)

фоном, совпадает со спектром сигнала, записанного сейсмометром СМ-3КВ, что наглядно демонстрирует работу метода коррекции. Пониженные значения спектра сейсмограммы, зарегистрированной СМ-3КВ, на частотах выше 25 Гц наблюдаются из-за фильтра нижних частот, установленного в измерительном канале. Однако имеет место запаздывание корректированного сигнала геофона относительно сейсмограммы СМ-3КВ. При локации источника, а также при включении измерительных точек, оборудованных корректированными GS20DX, в сейсмическую группу для многоканальной регистрации необходимо учесть различия в фазовых характеристиках измерительных каналов геофона (с последующей коррекцией) и сейсмометра СМ-3КВ.

Исследование фазово-частотных характеристик (ФЧХ) измерительных каналов геофона и СМ-3КВ, состоящих из датчика и усилителя, проводилось на вибростенде «ПСВУ» на частотах 20, 16, 12, 10, 8, 6, 5, 4, 3, 2, 1 Гц. Полученную лабораторную зависимость запаздывания корректированного геофона относительно СМ-3КВ дополнили результаты обработки экспериментальных данных (рис. 3). Фазовая задержка между корректированным геофоном и СМ-3КВ, определенная по данным от взрывов, в целом согласуется с лабораторной зависимостью, при этом разброс эмпирических значений лежит в диапазоне до 20 градусов. Отрицательные значения фазового сдвига на рис. 3 соответствуют запаздыванию геофона с расширенной частотной характеристикой относительно сейсмометра СМ-3КВ. При частоте опроса 200 Гц ошибка в 20 градусов будет составлять от 1 до 3 отсчетов в диапазоне частот 4–12 Гц.

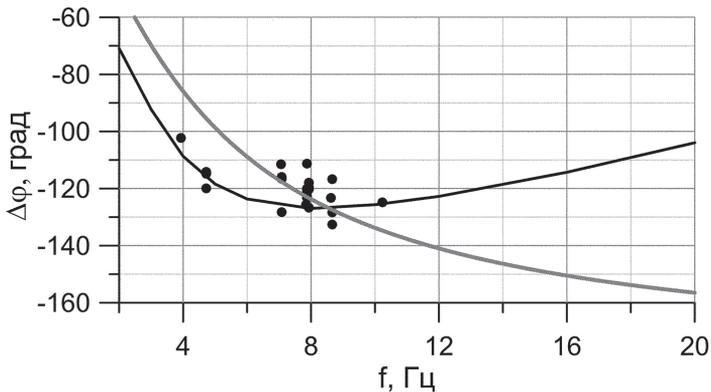


Рис. 3. Разница ФЧХ каналов геофона с учетом коррекции до 3 Гц и сейсмометра СМ-3КВ, полученная по результатам измерений на вибростенде (черная линия). Значки – экспериментальные результаты, полученные при обработке сейсмограмм от промышленных взрывов, зарегистрированных ГФО «Михнево». Серая линия – аппроксимация полученных зависимостей фазовым фильтром

Применение фазовых фильтров с амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) равной единице во всем диапазоне частот позволит учесть фазовое запаздывание. Варьируя параметр фильтра, можно построить ФЧХ фильтра максимально приближенную к лабораторной зависимости (рис. 3). В диапазоне частот 4–14 Гц, который включает в себя частоты сигналов от промышленных взрывов, отклонение от лабораторной и экспериментальной зависимостей, составляет допустимые 20 градусов для частот 4–12 Гц. А для частоты 14 Гц ошибка составляет 30 градусов,

что при частоте опроса 200 Гц составляет около одного отчета. Сейсмограммы на рис. 4 наглядно демонстрируют, что введение фазового фильтра позволяет учесть опережение СМ-3КВ относительно геофона.

Расширение частотной характеристики датчика СМ-3КВ проводилось для сильных землетрясений на телесеismicких расстояниях. На рис. 5 представлены сейсмограммы землетрясения 06.04.2013 г. с $M_w = 7.0$ (№ 3 из табл. 2), зарегистрированные датчиками СМ-3КВ (собственная частота 0.5 Гц), СМ-3КВ (с расширенной АЧХ до частоты 0.01 Гц) и широкополосным сейсмометром СМ-3-Д (собственная

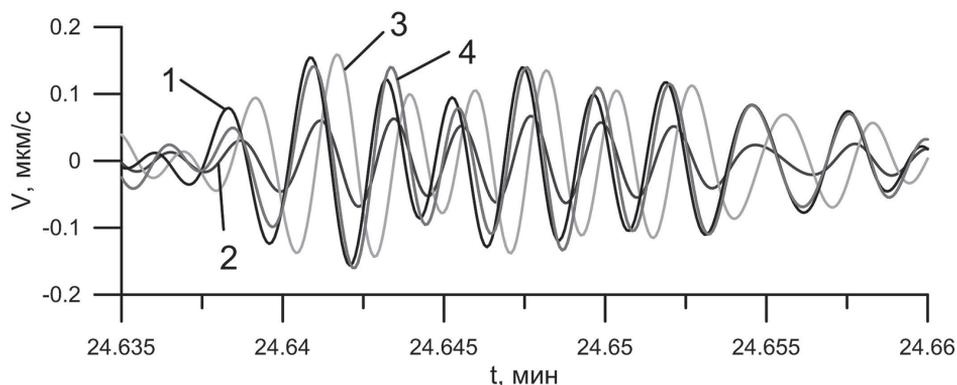


Рис. 4. Сейсмограммы промышленного взрыва 09.07.2013 г. на карьере вблизи г. Елец Липецкой области в полосе 4–8 Гц, зарегистрированные сейсмометром СМ-3КВ (1), геофоном GS-20DX (2), геофоном GS-20DX после коррекции (3), геофоном GS-20DX после коррекции и применения фазового фильтра (4)

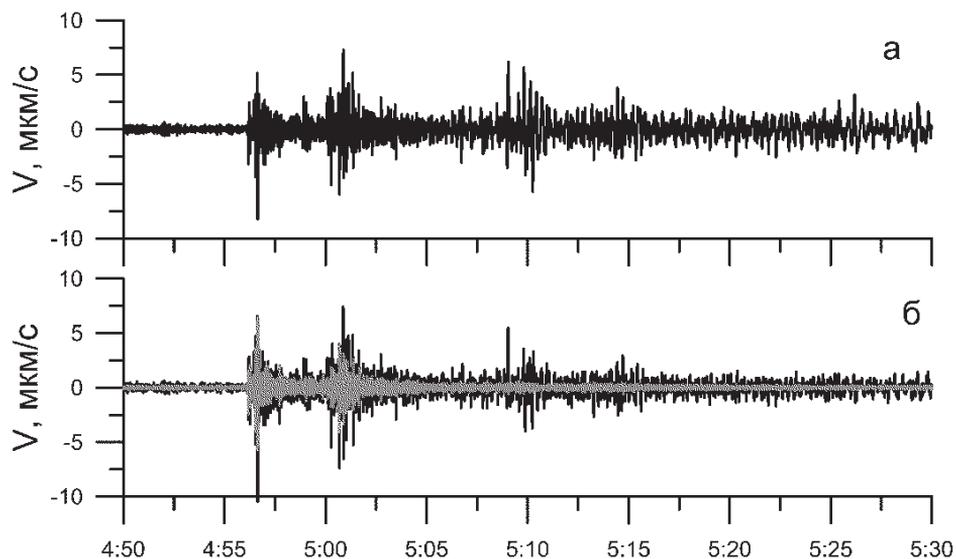


Рис. 5. Сейсмограммы землетрясения 06.04.2013 г. с $M_w = 7.0$, зарегистрированные сейсмометром СМ-3-Д (а), датчиками СМ-3КВ (б) – серая линия, СМ-3КВ с расширенной АЧХ до частоты 0.01 Гц (б) – черная линия. Данные отфильтрованы в полосе 0.03–5 Гц

частота 0.01 Гц). На записях СМ-3КВ, с расширенной АЧХ, можно видеть восстановленный цуг поверхностных волн, которые ранее не выделялись. Для событий из табл. 2 с $7.0 < M_w < 7.5$ была выполнена оценка максимальной амплитуды скорости колебаний для продольной Р-волны и поверхностной волны для исходной записи СМ-3КВ, СМ-3КВ с расширенной частотной характеристикой до 0.01 Гц и широкополосного датчика СМ-3-Д, выступающего в данном случае в качестве эталонного. Рассматриваемые записи предварительно фильтровались в диапазоне периодов $0.2 \text{ с} < T < 30 \text{ с}$ согласно стандартным процедурам определения магнитуды m_B и M_S . Полученные измерения, для рассматриваемой выборки, приведены в табл. 3, где V_0, V_1, V_2 – это максимальная амплитуда скорости колебаний, зарегистрированная СМ-3КВ, СМ-3КВ с расширенной АЧХ до частоты 0.01 Гц и широкополосным сейсмометром СМ-3-Д, соответственно. По рассчитанным значениям V_0/V_2 и V_1/V_2 для продольной и поверхностной волн в соответствии с (2) находилась ошибка $m_{B1}-m_{B2}$ и $M_{S1}-M_{S2}$, возникающая при определении разных типов магнитуд при коррекции. Магнитуда по объемной Р-волне m_{B1} , рассчитанная по записям СМ-3КВ с расширенной частотной характеристикой, имеет преимущественно завышенные значения в пределах 0.3 по сравнению с m_{B2} , определенной по данным широкополосного сейсмометра. Для магнитуды по поверхностной волне M_{S1} , определенной по результатам регистрации сейсмометра СМ-3КВ с расширенной АЧХ, наблюдаются заниженные значения на 0.03–0.3 относительно M_{S2} . Подобная ошибка в определении магнитуды сильных событий соответствует точности оценок магнитуд в различных каталогах [Ружич и др., 1998; Взрывы..., 2013].

Таблица 3

№	m_B				M_S			
	V_0/V_2	V_1/V_2	$m_{B0}-m_{B2}$	$m_{B1}-m_{B2}$	V_0/V_2	V_1/V_2	$M_{S0}-M_{S2}$	$M_{S1}-M_{S2}$
1	0.37	1.19	-0.43	0.08	0.01	0.59	-2.00	-0.23
2	0.27	0.74	-0.57	-0.13	0.07	0.68	-1.15	-0.18
3	1.23	1.27	0.09	0.10	0.03	0.47	-1.52	-0.33
4	0.56	0.88	-0.25	-0.06	0.08	0.75	-1.10	-0.12
5	0.82	1.17	-0.09	0.07	0.10	0.64	-1.00	-0.19
6	0.55	1.03	-0.26	0.01	0.44	0.70	-0.36	-0.15
7	0.73	1.35	-0.14	0.13	0.19	0.60	-0.72	-0.22
8	0.3	0.57	-0.52	-0.24	0.04	0.42	-1.40	-0.38
9	0.65	1.01	-0.19	0.00	0.05	0.54	-1.30	-0.27
10	0.45	1.09	-0.35	0.04	0.04	0.94	-1.40	-0.03

Обсуждение

Полученные результаты показывают, что малогабаритные геофоны с скорректированными частотными характеристиками могут заменить крупногабаритные и более дорогие сейсмоприемники, например СМ-3КВ, в диапазоне частот 4–14 Гц при проведении сейсмического мониторинга в платформенных условиях. В этом

диапазоне лежат первые вступления объемных волн от взрывов. Для некоторых карьеров, например, в районе Подольска, городов Алексин (Новогуровский карьер) и Коломна (Щуровской карьер) характерно наличие поверхностных волн Рэлея с периодом 1.0–1.1 с [Черных, 2011]. Волны такого диапазона периодов остаются вне инструментальных возможностей геофона с расширенной АЧХ (до 3 Гц). Для определения эпицентрального расстояния по данным одной сейсмической группы необходимо найти разности времен между моментами вступлениями нескольких сейсмических фаз (например, P_g- и S_g- волн), порождаемых этим событием. Азимут определяется с помощью fk-анализа [Сарон, 1969] записей вертикальных каналов группы путем нахождения величины временного сдвига для каждого канала. Таким образом, отсутствие продольной волны на зарегистрированной сейсмограмме не отразится на локации источника. Создание таких дополнительных точек регистрации, оборудованных геофонами, в малоапертурной группе позволит улучшить точность локации сигналов от промышленных взрывов, а также сигналов иной природы в диапазоне 4–14 Гц.

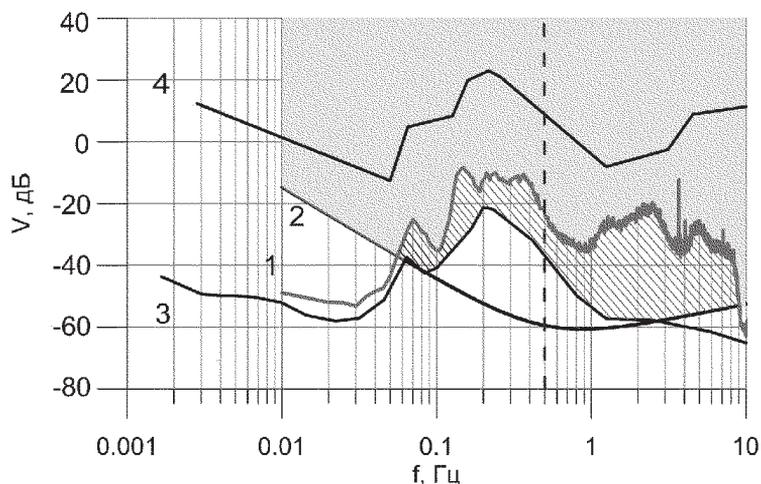


Рис. 6. Двойная амплитуда скорости в полсе 1 октава: (1) уровень микросейсмического фона, измеренный STS-2 на ГФО «Михнево»; (2) шум канала GS-20DX после коррекции; (3) шум СМ-ЗКВ после коррекции; (4, 5) минимальный и максимальный уровни микросейсм по модели Петерсона; пунктирная линия соответствует собственной частоте датчика СМ-ЗКВ и разделяет рабочую полосу сейсмометра и диапазон, расширенный с помощью коррекции

Обработка данных сильных землетрясений и результаты моделирования шума измерительного канала СМ-ЗКВ [Беседина и др., 2011] позволяют сделать вывод о границах применимости метода коррекции для подобных датчиков. На рис. 6 представлен уровень собственных шумов измерительного канала СМ-ЗКВ в сопоставлении с микросейсмическим фоном в ГФО «Михнево». Фоновые микросейсм с амплитудами скорости и частотами, попадающими в заштрихованную область, а также сейсмические сигналы с соответствующими параметрами из области с серой заливкой удовлетворяют условиям применимости метода коррекции сейсмометра СМ-ЗКВ. Для них уровень полезного сигнала будет превышать уровень инструментального шума измерительного канала, а при регистрации сейсмических сигналов и уровень микросейсмического фона.

Выводы

Проведенное исследование показывает, что малогабаритные геофоны с скорректированными частотными характеристиками могут служить разумной альтернативой крупногабаритным и более дорогостоящим короткопериодным сейсмометрам в диапазоне частот 4–14 Гц при проведении сейсмического мониторинга в платформенных условиях. В свою очередь, в отсутствие широкополосных датчиков для решения широкого круга задач, связанного с регистрацией землетрясений и низкочастотных сигналов, можно использовать сейсмометр СМ-ЗКВ с расширенной частотной характеристикой. Ошибка определения магнитуд по записям подобных датчиков при этом соответствует точности оценок магнитуд в каталогах.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ (проект № 13-05-00950-а), гранта Правительства РФ – Ведущие научные школы РФ (НШ-3345.2014.5).

Литература

Беседина А.Н., Кабыченко Н.В., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В. Коррекция частотных характеристик сейсмических датчиков и шумы соответствующих измерительных каналов // Сейсмические приборы. 2011. № 2. Т. 47. С. 11–20.

Беседина А.Н. Научное обоснование методов коррекции волновых форм при проведении сейсмических наблюдений: дисс. канд. физ.-мат. наук: 25.00.10 / Беседина Али-на Николаевна; Москва: ИДГ РАН, 2014. – 143 с.

Взрывы и землетрясения на территории Европейской части России (под ред. В.В. Адушкина и А.А. Маловичко). М.: ГЕОС, 2013. 384 с.

Гик Л.Д., Карандеев К.Б. Электрическая коррекция виброизмерительной аппаратуры. Новосибирск: Изд. СО АН СССР, 1962. 130 с.

Давыдов А. Цифровая обработка сигналов. Деконволюция цифровых сигналов [Электронный ресурс]. URL: prodav.exponenta.ru/dsp/doc/dsp13.doc. 2007.

Карандеев К.В., Гик Л.Д. Про один метод синтезу коректуючих Г-подібних чотириполюсників // Доповіді Академії Наук Української РСР. 1959. № 12. С. 1312–1315.

Ружич В.В., Левина Е.А., Писаренко В.Ф., Любушин А.А. Статистическая оценка максимальной возможной магнитуды землетрясения для Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 1998. Т. 39, № 10. С. 1443–1455.

Санина И.А., Волосов С.Г., Черных О.А., Асминг В.Э., Солдатенков А.М., Ризниченко О.Ю. Синтез и опыт экспериментального применения двухмерной малоапертурной сейсмической антенны «Михнево» // Сейсмические приборы. Москва: ИФЗ РАН, 2008. Вып. 44. С. 3–18.

Черных О.А. Сейсмический мониторинг Восточно-Европейской платформы с применением малоапертурной группы «Михнево»: дисс. канд. физ.-мат. наук: 25.00.10 / Олег Анатольевич Черных; Москва, ИДГ РАН-М., 2011. – 103 с.

Сарон J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis // Proceedings of the IEEE. 1969. V. 57, Iss. 8. P. 1408–1418.

Havskov J., Alguacil G. Instrumentation in Earthquake Seismology / Modern Approaches in Geophysics. Springer Academic Publishers. 2002. P. 313.

Scherbaum F. Of Zeros and Poles. Fundamentals of Digital Seismology / Modern Approaches in Geophysics, Kluwer Academic Publishers. 1996. P. 256.