

рис. 3, б. Оси пронумерованы в относительных единицах измерений полуосей. Для реальных сейсмических сигналов абсолютные значения измеряют в единицах длины, как правило, в микрометрах.

На практике резкое изменение значений поляризационных параметров может быть вызвано приходом новой фазы сейсмической волны, которая начинает интерферировать с пришедшей ранее. При этом временное разрешение поляризационного анализа в измерителе ИИС должно быть достаточным, чтобы выделить этот приход, зарегистрировав скачок параметров.

Описанный в данной статье математический аппарат формирования тестовых сигналов с заданными свойствами поляризационных параметров позволяет исследовать возможности конкретных способов поляризационного анализа, заложенных в программно-математическое обеспечение ИИС, а также оценить точностные характеристики последних и сделать вывод об их исправности (за исключением блока датчиков ИИС).

Литература

1. **Poplavskiy A. S, Le Bras R. J.** Recordings of Long-Period Fluctuations Associated with the Passage of Three Distinct Tsunamis at Broadband Seismometers Made at the International Monitoring System (IMS) Hydroacoustic T-station H06 (Socorro Island, Mexico) // *Seism. Res. Let.* 2013. V. 84. N. 4. P. 1—12.
2. **Пат. 2168744 РФ.** Способ измерения параметров поляризации векторного сигнала / В. П. Шевченко, А. Л. Колесников, А. С. Поплавский // *Изобретения. Полезные модели.* 2001. № 16.
3. **Шевченко В. П.** Методологические основы дифференциального поляризационного анализа векторных сигналов // *Измерительная техника.* 2002. № 12. С. 9—11.
4. **Шевченко В. П.** Однопунктная поляризационная обработка векторных сигналов. Серпухов: Военная академия РВСН им. Петра Великого, 2012.

Дата принятия 07.05.2015 г.

550.34.03

Измерительная и регистрирующая аппаратура для сейсмического микрорайонирования

В. Б. ЗААЛИШВИЛИ

Геофизический институт ВНЦ РАН, Владикавказ, Россия, e-mail: vzaal@mail.ru

Проведено сравнение основных технических характеристик отечественного полевого сейсмологического оборудования. Рассмотрены этапы прямого выявления линейных, нелинейно-упругих и неупругих деформаций в геосреде с помощью полевой аппаратуры для сейсмического микрорайонирования.

Ключевые слова: сейсмическое микрорайонирование, приемное и регистрирующее оборудование, программы обработки данных.

The comparison of the basic technical characteristics of domestic field seismological equipment is carried out. The stages of direct detection of linear, nonlinear-elastic and inelastic deformations in geological medium by means of field instrumentation for seismic microzoning are considered.

Key words: seismic microzoning, measuring instrumentation, receiving and recording equipment, data processing software.

В данной статье основное внимание уделено современным разработкам измерительной аппаратуры, используемой в отечественных исследованиях по сейсмическому микрорайонированию (СМР), которая по многим параметрам не уступает аналогичным зарубежным образцам, но при этом намного дешевле. Это относится к измерительной технике, оборудованию и компьютерным программам приема, регистрации и последующей обработке сигнала. Исследования показали, что описываемая измерительная аппаратура и обрабатывающие программы в достаточной степени надежны.

Измерительная аппаратура. Получение высококачественных результатов наблюдений зависит напрямую от правильности выбора и качества измерительной аппаратуры [1]. Аппаратура, которая позволяет измерять сигнал, харак-

теризующий то или иное физическое поле, обычно включает приемное, регистрирующее оборудование и соответствующие компьютерные программы распознавания, обработки и анализа данных.

При организации группы SMART-1 (Тайвань, 1982—1987) и при регистрации Черногорского землетрясения (Югославия, 1979) использовали акселерографы SMA-1 и SMA-2 [2]. Анализ различных показателей движения грунта, вычисленных после обработки записей землетрясений, показал адекватность полученных результатов, что свидетельствует о высокой надежности рассматриваемой аппаратуры.

В 1996 г. при СМР ряда промышленных площадок в России применяли несколько устаревшие велосиметры WILMORE МК-III-A (Великобритания) и акселерометры А-1632, А-1633 (Россия) — трехкомпонентные приемники ус-

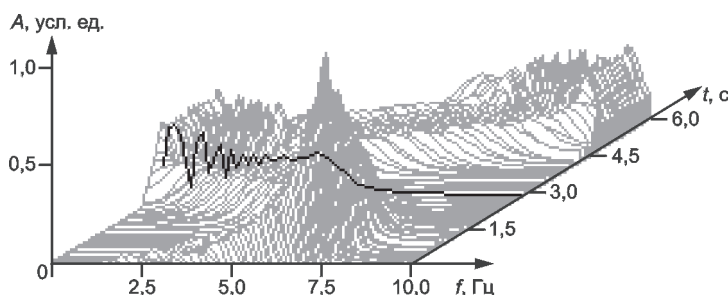


Рис. 1. Трехмерное изображение амплитудного спектра сигнала

корений с частотным диапазоном 0,8—200 Гц, где основой чувствительных элементов являлся пьезоэлектрический биморф. Для тех же целей могли быть использованы сейсмоприемники производства СССР — ВЭГИК, С-5-С, СМ-3, ОСП-2, но они, как правило, уступают зарубежным аналогам из-за громоздкости, необходимости преобразовывать (оцифровывать) вручную или полуавтоматически полученные данные для последующего расчета спектра колебаний и нестандартности основных технических параметров, предполагающей трудоемкую градуировку аппаратуры.

Современные сейсмоприемники отечественного производства СПВ-3К по основным показателям не уступают аналогичным зарубежным образцам и позволяют получать при инструментальных наблюдениях вполне надежные данные.

Регистрирующая аппаратура. В России в последние десятилетия разработаны достаточно совершенная регистрирующая аппаратура и программы сбора и обработки инструментальных данных [3]. Использованное ранее в практических работах по сейсмическому микрорайонированию устройство управления и регистрации сигналов, выполненное на IBM PC, имело частотный диапазон 0—250 Гц, динамический — не менее 96 дБ, количество каналов регистрации — до 16. Источник электропитания BACK UPS 650 позволял при перезарядке сменного источника достигать необходимой для проведения полноценных наблюдений продолжительности исследования (не менее 2 ч).

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) в виде плат L-502, L-780M, L-783M, L-791 с современным интерфейсом PCI Express предназначен для ввода и предварительной обработки данных в реальном масштабе времени на частотах до 84 кГц. Его особенность — процессор ADSP-2185M фирмы ANALOG DEVICES (США), позволяющий строить практически любую схему ввода (вывода) с одновременной обработкой сигналов. Программное обеспечение для сигнального процессора расширяет функциональные возможности платы и поддерживает сбор данных по 16-ти дифференциальным каналам с одновременной цифровой фильтрацией сигналов и вывод данных на цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП).

Программа LGraph 2 (Power Graph) работает с АЦП серии L-CARD, регистрирует при произвольном выборе от 1 до 32 сигна-

лов и изменяет частоту их дискретизации от максимальной рабочей до нуля. Программа поддерживает режим осциллографа, позволяет изменять горизонтальный и вертикальный масштабы на экране монитора, определять время прихода волны, проводить сглаживание сигнала, фильтрацию, расчет фазовых и амплитудных спектров, построение спектральных карт, определять взаимные спектры, выполнять статистический и когерентный анализы. При работе с комплексными сигналами используются действительная и мнимая части сигнала во временной области. На мониторе в окне «Спектральная карта» строится изменение амплитудного спектра сигналов в виде трехмерного изображения (рис. 1). С помощью данной системы можно отображать часть сигнала, соответствующую тому или иному спектру, в отдельном окне, для последующей обработки.

В России большое распространение получили регистраторы Дельта-Геон («ЛогиС», Раменское). С помощью первого поколения этих регистраторов 20 сентября 2002 г. получены уникальные записи процесса схода ледника Колка. В настоящее время некоторые системы наблюдений комплектуются регистраторами SDAS (Геофизическая служба РАН).

В табл. 1 сопоставлены современные отечественные регистраторы сейсмических сигналов SDAS и Дельта-Геон-2. По многим техническим параметрам Дельта-Геон превосходит SDAS, однако последний регистрирует сигналы, начиная с частоты 0,01 Гц, а первый — 0,1 Гц, что ограничивает его использование при мониторинге событий, характеризующихся низкочастотным спектральным составом.

Сейсморазведочные станции. При работах с взрывными и невзрывными источниками в качестве измерительной аппаратуры использовали сейсморазведочные станции различных типов: СС-24П, СС-30-60, ПОИСК-6/12-АСМ, СМП-24. Наиболее удачной из отечественной многоканальной аппаратуры была переносная 24-канальная сейсмическая станция СС-24П, усилители которой рассчитаны на регистрацию колебаний в диапазоне 30—120 Гц [4]. При инженерно-геологических исследованиях различного назначения достаточно широко применяли одноканальные сейсмические установки ОСУ-1, ОСУ-2 с сейсмоприемниками СПЭД-56М, СВ-30, СПМ-16, ВЭГИК.

Таблица 1

Сопоставление технических характеристик российских регистраторов сейсмических сигналов

Характеристика	Марка регистратора	
	SDAS	Дельта-Геон-2
Разрядность	16	24
Накопитель	Винчестер 2 Гб	Flash до 2 Гб
Температура, °С	0 ... +40	–40 ... +55
Точное время	GPS	GPS и внутреннее
Частота квантования (отсчетов), с ^{–1}	200	1000
Частотный диапазон, Гц	0,01—30	0,1—240
Мощность, Вт	30 + 120(от ПЭВМ) = 150	1,6
Алгоритм обнаружения	LTA/STA (одна полоса)	LTA/STA (четыре полосы)
Диапазон регулирования усиления, дБ	0—40	0—60
Вариант исполнения	Стационарный + ПЭВМ	Полевой, массой 2,8 кг

Указанные комплекты аппаратуры с большой точностью определяют скорости распространения сейсмических волн от искусственных источников, показатели затухания сигнала и другие величины. При исследовании динамических характеристик сейсмических волн широкое использование сейсморазведочных станций ограничено тем, что часть низкочастотных составляющих первоначального сигнала отсекается, так как усилительные устройства эффективнее для высокочастотной составляющей сигнала. При этом одновременно с сохранившейся частью сигнала усиливаются и случайные помехи, что вызывает необходимость включать в измерительный тракт фильтры различной частоты, еще более искажающие амплитудно-частотную характеристику исходного сигнала. Следовательно, в подобных исследованиях целесообразно использовать широкополосный канал, регистрирующий сейсмические волны в широком спектре частот.

В настоящее время происходит стремительное развитие отечественного высококачественного полевого сейсмологического оборудования. Россия производит цифровые регистраторы Дельта-Геон, SDAS, трехкомпонентные сейсмоприемники (ИФЗ РАН), 24-канальную сейсморазведочную станцию «Лакколит» и георадар «ОКО» (Логис) — оборудование для изучения физического состояния грунтов, пустот в горной породе и под водой (табл. 2). Анализируя данные таблицы, приходим к выводу, что выбор сейсморазведочной станции полностью зависит от целей исследования и решаемых задач. Так, сейсморазведочная станция ЛАККОЛИТ-ХМ4 выгодно отличается от ЛАККОЛИТ-ХМ3 расширенным до 0,5 Гц низкочастотным диапазоном [5]. При этом можно использовать не только линейные профили, но и телеметрические.

Программа обработки сигналов. В качестве примера рассмотрим программу GEMIS_WIN, первая версия которой разработана в 1997 г в России Институтом сейсмологических и геофизических исследований; ее аналогами являются программы PowerGraph и ACTest. Программа обеспечивает работу с сейсмическими сигналами, полученными регистрирующей станцией. Зарегистрированный сигнал направляется в базу данных «Эксперименты», которая позволяет организовывать хранение большого числа данных, отображать и редактировать дополнительную информацию о построенных образах сигнала. Так на мониторе в окне «Образ сигнала» проводят различные действия с исходным сигналом: выделяют и рассматривают любую его часть с выбранным разрешением по осям абсцисс и ординат, произвольное число особенностей записей, используют различные виды интерполяции при построении графиков и т. д. Для выделения полноценной информации и уменьшения отношения сигнал — шум исходный сигнал можно отфильтровать с помощью соответствующей программы, реализующей фильтры в аппроксимации Баттерворта верхних и нижних частот с выбором частот среза (рис. 2).

Данные инструментальных записей можно обработать и методами многовариантного статистического анализа (регрессионного, факторного, кластерного, дискриминантного), используя специальные разработки, а также зарубежные современные пакеты статистических программ.

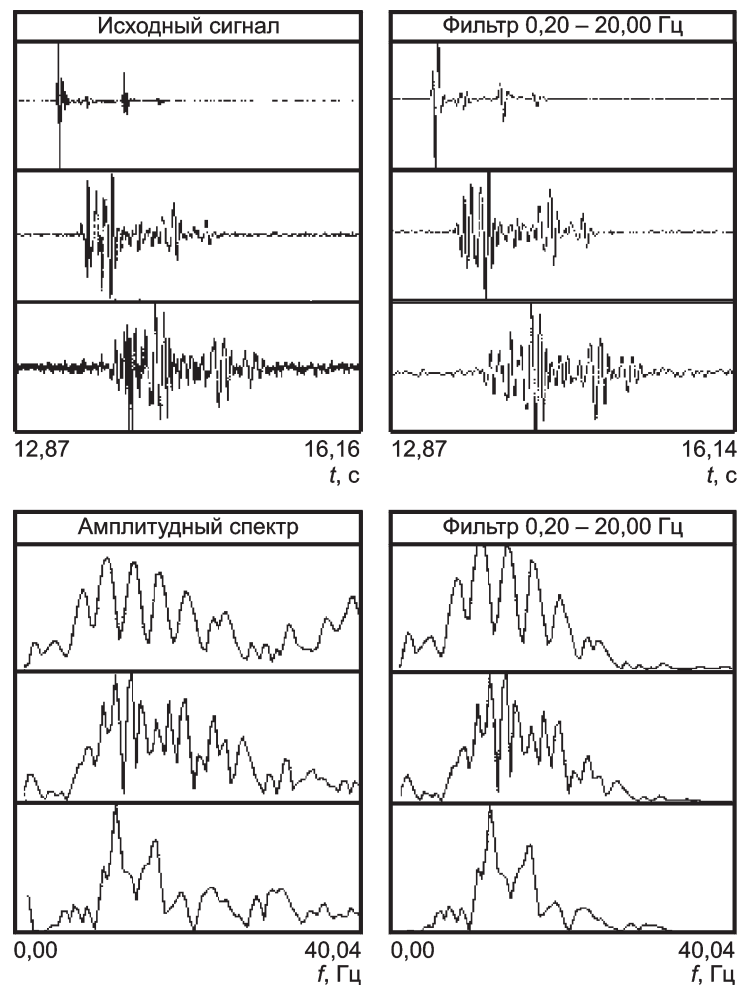


Рис. 2. Преобразование исходного сигнала и соответствующего амплитудного спектра (фильтрация в области ВЧ-диапазона)

Выявление нелинейных и неупругих свойств грунтов.

Поскольку при сильных землетрясениях (Ниигата, 1966 г.; Кобе, 1995 г.), как правило, наблюдаются разжижение грунта и неравномерное осаднение сооружений, оценка прямыми измерениями возможной нелинейности (неупругости) грунтов при интенсивных сейсмических воздействиях является актуальной задачей инженерной сейсмологии. Для проведения экспериментальных исследований по выявлению возможной неупругости грунтов и ее оценки используют специальную оригинальную схему (рис. 3), разработанную автором, включающую мощный газодинамический импульсный источник ГСК-6М и два однотипных излучателя [3]. Избранное расположение продольного профиля позволяет двумя излучателями попеременно воздействовать из прилегающей и несколько удаленной зон излучений. При воздействии на поверхность грунта удаленным излучателем I в соответствующем спектре колебаний преобладает низкочастотная (НЧ) область, а относительно малая высокочастотная (ВЧ) область в спектре колебаний грунта быстро затухает уже на втором пункте наблюдений (стоянке). Анализ спектров колебаний грунта, вызванных ближним излучателем II, показывает, что в спектре преобладает ВЧ-область, составляющие которой с расстоянием также затухают, тем не ме-

Таблица 2

Характеристики сейсморазведочных станций

Характеристики	ЛАКОЛИТ Х-МЗ	ЛАКОЛИТ-ХМ4	SGD-SEL	ЭЛИСС-3	ЛАКОЛИТ МТ	ТЕЛСС-3	Телсс-402/403
Тип станции	Линейная	Линейная	Линейная	Линейная	Телеметрическая	Телеметрическая	Телеметрическая
Количество каналов, шт	24–1024	24–1024	48 или 24	1–96	6 с возможностью наращивания от 12 до 96	до 960	до 960
Разрядность АЦП, бит	24	24	24	24	—	32	32
Мгновенный динамический диапазон, дБ	105	130	105	120	≤115 полный динамический диапазон 140	130	130
Коэффициент усиления предварительного усилителя, дБ	0; 6; 12; 18; 20; 26; 32; 38; 40; 46; 52; 58; 60; 66; 72; 78	0; 6; 12; 18; 20; 26; 32; 38; 40; 46; 52; 58; 60; 66; 72; 78	1; 2; 4; 8; 16; 32; 64; 128	0; 12; 24; 36; 48	0, 20, 40	0; 12; 24; 36	0; 12; 24; 36
Период дискретизации, мс	0,03125; 0,0625; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4	0,25; 0,5; 1; 2; 4	0,125; 0,25; 0,5; 1; 2	0,0125; 0,05; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4	0,0625—2	0,25; 0,5; 1; 2; 4	0,25; 0,5; 1; 2; 4
Частотный диапазон, Гц	5—4000	0,5—1000	0—197 (396, 791, 1575, 3180)	0—32000	0,1—4000	0—1600	0—1600
Максимальная длина записи, отсчет/канал	5120	40500	340 физических наблюдений длительностью 2000 отсчетов каждое	8192	—	4096	4096 (по спец. заказу)
Время задержки регистрации (предзапуска), отсчет	±512	±512	—	—	± 512	±32	±32
Максимальный входной сигнал при минимальном усилении, В	—	—	±2,5	±2,5	—	±2,5	±2,5
Уровень собственных шумов регистрирующего канала, мкВ	0,2	0,06	0,15	0,1	—	0,08	0,08

Характеристики	ЛАКОЛИТ-ХМЗ	ЛАКОЛИТ-ХМ4	SGD-SEL	ЭЛЛИСС-3	ЛАКОЛИТ МТ	ТЕЛСС-3	Телсс-402/403
Коэффициент нелинейных искажений, %	0,007	0,003	≤0,003	0,001	≤0,003	0,005	0,0005
Взаимные влияния между каналами, дБ	103	103	110	130	90	130	130
Коэффициент подавления синфазного сигнала, дБ	103	120	не менее 80	100	120	120	120
Питающая внешняя аккумуляторная батарея, В	8,4—15,6	8,4—15,6	10,5—28	10—18	12 (встроенный аккумулятор)	12—30	12—24
Температурный диапазон бортового комплекса, С°	–40...+50	–40...+50	–20...+60	–40...+70	–30...+50	–40...+70	–40...+70
Масса бортового комплекса, кг	1,26	1,26	6 или 4	2,9	1,48	менее 1,6	1,9
Габаритные размеры бортового комплекса, мм	250×170×55	250×170×55	340×295×152	340×295×152	400×65	306×166×90	230×167×90
Блок управления	ноутбук/планшет/внешний	ноутбук/планшет/внешний	ноутбук/планшет/встроенный компьютер	ноутбук/планшет/встроенный компьютер	ноутбук/планшет/внешний	ноутбук/планшет	ноутбук/планшет
Наличие портового модуля	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Да	Да
Интерфейсы передачи данных	Ethernet	2xEthernet	USB	USB	Ethernet 100 Base-T	USB/Ethernet/Wi-Fi	USB
Гарантия, мес	18	18	24	36	—	36	36

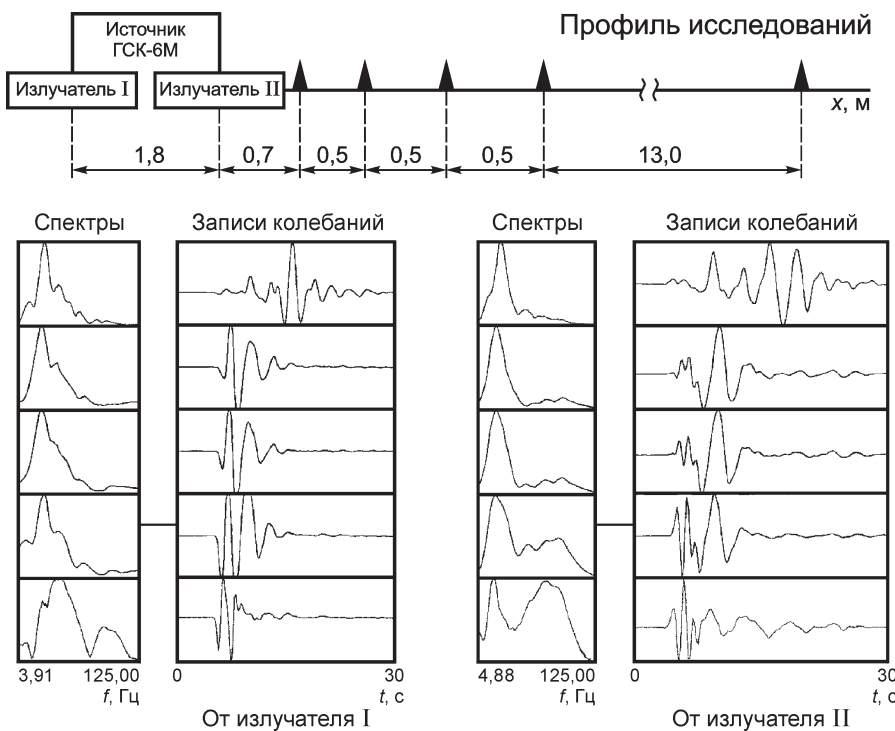


Рис. 3. Схема и результаты исследования спектральных особенностей колебаний грунта, возбуждаемых мощным невзрывным импульсным источником ГСК-6М:

▲ — пункты наблюдений (стоянки) с акселерометрами

нее, проявляясь вполне отчетливо, почти до конца всей длины профиля.

Изучив спектры колебаний грунта с монотонным удалением от источника, можно с высокой обоснованностью выявлять границы неупругой, нелинейно-упругой и линейно-упругой областей деформирования геосреды. При неупругих деформациях основная энергия сосредоточена в ВЧ-диапазоне спектра, при нелинейно-упругих — в НЧ- и частично в ВЧ-диапазонах. Спектр сигнала в дальней, практически, линейно-упругой зоне характеризуется симметричной формой в НЧ-области. Более детальный анализ показывает, что в зависимости от вида и физического состояния исследуемых грунтов, а также амплитуды и других параметров динамического воздействия, весовой вклад ВЧ- и НЧ-составляющих колебаний спектра может заметно меняться при сохранении в целом картины рассмотренных явлений.

Необходимо отметить, что упругие линейные и нелинейные колебания характеризуются для данного источника постоянством площади реального спектра, что является показателем уровня энергии конкретного источника, поглощаемой деформируемым грунтом.

Исследование записей сильных и разрушительных землетрясений, а также специальных экспериментальных динамических воздействий, показал, что при неупругих явлениях площадь спектров соответствующих колебаний грунта

непостоянна. Она характеризуется уменьшением, обусловленным необратимыми потерями при неупругих деформациях и тем больше, чем меньше прочность грунта и сильнее воздействие.

Выводы. Получение высококачественных результатов наблюдений зависит от качества и корректности использования измерительной аппаратуры. В настоящее время в России выпускается достаточно качественное оборудование для проведения сейсмического микрорайонирования, построенное на импортных комплектующих. Российская программа GEMIS_WIN работает с сейсмическими сигналами, зарегистрированными измерительной аппаратурой, создает базу результатов измерений, позволяет иерархически организовать хранение большого числа данных, отображать и редактировать дополнительную информацию о построенных образах сигнала. Обработка данных проводится методами многовариантного статистического анализа, с использованием специальных разработок, а также современных зарубежных пакетов статистических программ.

Проведение полевых исследований с использованием газодинамического импульсного источника ГСК-6М позволяет выявлять и оценивать нелинейные и неупругие свойства грунтов.

Л и т е р а т у р а

1. **Заалишвили В. Б., Голик В. И.** Геофизические методы исследования сейсмике природных и техногенных массивов. Владикавказ: Центр геофизических исследований ВНИЦ РАН и PCO-A, 2013.
2. **Beresnev I., Wen K. L., Yeh Y. T.** Source, path and site effects on dominant frequency and spatial variation of ground motion recorded by SMART 1 and SMART 2 Arrays in Taiwan // Proc. 10th Europ. Conf. Earthquake Eng. Vienna, 1994.
3. **Заалишвили В. Б.** Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. М.: Наука, 2009.
4. **Никитин В. Н.** Основы инженерной сейсмике. М.: МГУ, 1981.
5. **Сейсморазведочные станции** [Электрон. ресурс] www.geodevice.ru (дата обращения 01.12.2014 г.)

Дата принятия 06.04.2015 г.