

На правах рукописи

Беседина Алина Николаевна

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ
МЕТОДОВ КОРРЕКЦИИ ВОЛНОВЫХ
ФОРМ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ
СЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ**

Специальность 25.00.10

«Геофизика, геофизические методы поисков полезных
ископаемых»

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2014

Работа выполнена в федеральном бюджетном учреждении науки Институте динамики геосфер Российской академии наук (ИДГ РАН)

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор
ИДГ РАН

Геворг Грантович Кочарян

Научный консультант:

кандидат технических наук
ИДГ РАН

Николай Васильевич Кабыченко

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
ИТПЗ РАН

Михаил Владимирович Родкин

кандидат технических наук
ОАО ВНИПИпромтехнологии

Борис Глебович Лукишов

Ведущая организация:

Геофизическая служба РАН, г. Обнинск

Защита состоится 20 марта 2014 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета Д002.050.01 федерального бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер Российской академии наук по адресу: 119334 г. Москва, Ленинский проспект, д.38, корпус 1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИДГ РАН.

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

В.А. Рыбаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Сейсмологические наблюдения включают в себя чрезвычайно широкий спектр измерений – от регистрации сверхнизкочастотных движений (например, приливных волн) до контроля сигналов килогерцового диапазона частот при мониторинге шахтной сейсмичности. В зависимости от поставленных физических задач используются первичные преобразователи различных типов, соответствующие необходимому диапазону частот.

В последние годы общемировая тенденция сейсмологических наблюдений, особенно в сейсмоактивных регионах, заключается в резком увеличении количества стационарных и временных сеймостанций и оснащении их широкополосной высокочувствительной аппаратурой. Реалии, сложившиеся на территории нашей страны, таковы, что количество используемой широкополосной аппаратуры относительно невелико. Большинство станций в таких тектонически активных районах как Байкальская рифтовая зона, Бурятия, Северный Кавказ и др. оборудованы в основном короткопериодными датчиками, которые в состоянии решать лишь ограниченный круг задач.

При проведении сейсмического мониторинга существует ряд актуальных проблем, решение которых требует проведения измерений в широком диапазоне частот. Например, при мониторинге особо ответственных объектов широко используются короткопериодные сейсмологические датчики, заметное увеличение количества которых приводит к существенному удорожанию измерений. Одним из возможных решений данной проблемы является применение в качестве дополнительных датчиков значительно более дешевых геофонов с расширенным в длиннопериодную область частотным диапазоном.

Расширение рабочего диапазона частот короткопериодных датчиков как в низкочастотную, так и в высокочастотную область позволит существенно увеличить их возможности. Это, например, позволит корректно регистрировать цуги длиннопериодных поверхностных волн от удаленных землетрясений и более точно рассчитывать такие характеристики очага, как сейсмический момент и излученная сейсмическая энергия.

При исследовании длиннопериодных движений коррекция зарегистрированных волновых форм может оказаться полезной даже для широкополосных приборов типа STS-2 и STS-1. К таким задачам относятся, например, совместная интерпретация результатов сейсмологических и гидрогеологических исследований, где важную роль играют эффекты приливных деформаций, а также такое новое направление исследований, как изучение

сверхнизкочастотных движений (периоды десятки минут – часы), проявляющихся в микросейсмическом фоне.

Хотя методика коррекции волновых форм известна, пределы ее применимости для различных датчиков, в разных диапазонах частот, амплитуд и уровней сейсмического шума практически не обсуждались и не проверялись экспериментально.

Целью настоящей работы является научное обоснование методов коррекции волновых форм для первичных преобразователей разных частотных диапазонов, а также применение этих методов для расширения возможностей сейсмических наблюдений при решении широкого круга физических задач.

Задачи исследования

- Анализ существующих способов расширения рабочего диапазона сейсмических датчиков.
- Развитие и экспериментальная проверка в лабораторных и полевых экспериментах метода коррекции волновых форм для различных измерительных каналов в широком частотном диапазоне. Определение границ применимости метода.
- Применение методов коррекции волновых форм при проведении сейсмического мониторинга на территории Восточно-Европейской платформы.
- Определение возможных источников возникновения ошибок при оценке характеристик очагов слабых сейсмических событий.
- Проведение совместного анализа результатов сейсмических и гидрогеологических наблюдений для определения особенностей приливного отклика трещинно-порового коллектора подземных вод.

Достоверность полученных результатов обеспечивается значительным объемом обработанных и проанализированных экспериментальных данных, полученных с использованием апробированных методик измерений, тщательным анализом имеющихся опубликованных материалов, сопоставлением полученных данных с существующими представлениями, результатами численных расчетов и аналитическими оценками.

Научная новизна работы заключается в следующем

- Отработан и адаптирован к широко используемым в России измерительным каналам метод программной коррекции волновых форм с целью расширения рабочего диапазона частот сейсмических датчиков.
- Впервые экспериментально определены границы применимости метода для различных первичных преобразователей с учетом условий проведения измерений.
- Предложено и апробировано использование «модифицированных» геофонов в составе малоапертурных групп «Михнево» и «Монаково».

- На основании модельных расчетов оценены количественные поправки к геомеханическим характеристикам очагов слабых событий, определяемым по измеренным значениям энергетического класса и магнитуды m_b .

- Впервые в платформенных условиях на основе совместного анализа результатов сейсмических и гидрогеологических наблюдений проведено исследование приливного отклика флюидонасыщенного карбонатного коллектора трещинно-порового типа и выполнена оценка вариаций его проницаемости.

Личный вклад автора

В ходе работы автор принимал непосредственное участие в отработке и экспериментальной проверке метода коррекции, его адаптации к используемой аппаратуре, в создании алгоритма для проведения потоковой многоканальной обработки данных, постановке и проведении лабораторных и полевых экспериментов, расчетов и аналитических оценок, анализе получаемых результатов, обработке результатов сейсмического мониторинга на нескольких объектах и данных гидрогеологических наблюдений на ГФО «Михнево».

Практическая ценность работы состоит в научном обосновании процедуры использования метода коррекции волновых форм с целью расширения рабочего диапазона частот сейсмических датчиков различных типов и определении границ адекватного использования созданной методики. Полученные результаты могут быть использованы при проведении сейсмических наблюдений как малоапертурными сейсмическими группами, так и отдельными станциями. Результаты модельных расчетов могут быть использованы для уточнения геомеханических характеристик очагов слабых событий по результатам сейсмического мониторинга.

Развитый в работе подход к определению фильтрационных параметров массива по фазовым характеристикам приливного отклика скважин имеет практическое значение как «невозмущающий» метод оценки вариаций проницаемости коллектора

Защищаемые положения

- Метод коррекции волновых форм адаптирован для расширения рабочего диапазона частот различных измерительных каналов, широко используемых в России при проведении сейсмологических наблюдений.

- Экспериментально установлены границы применимости метода программной коррекции для короткопериодных датчиков СМ-ЗКВ и высокочастотных геофонов GS-20DX с учетом условий проведения измерений.

- Неточности, возникающие при оценке характеристик очагов слабых сейсмических событий, связаны с эффектом радикального искажения с расстоянием высокочастотной

части спектра излучаемых колебаний и с пересчетом определяемых инструментально магнитуд M_L и m_b в моментную магнитуду M_w . Эти неточности могут быть учтены при помощи коррекции волновых форм, а также поправок, зависящих от расстояния, масштаба события и характеристик среды. Величина поправок определена по результатам расчетов, выполненных на основе модели Брюна.

- Совместная обработка данных сейсмологических и гидрогеологических наблюдений позволяет выделить временные интервалы, пригодные для корректного определения вариаций фильтрационных параметров коллектора по фазовым характеристикам приливного отклика скважин.

Апробация работы

Работа выполнена в рамках обучения в очной аспирантуре Московского физико-технического института на кафедре «Теоретическая и экспериментальная физика геосистем».

Основные положения работы докладывались на конференциях «Проблемы сеймотектоники» (г. Москва, 2011 г.), ученом совете ИДГ РАН (г. Москва, 2011 г.), Научно-техническом совете ИФЗ РАН (г. Москва, 2011 г.), Европейском сейсмологическом конгрессе ESC (г. Москва, 2012 г.), 12-ой международной конференции по изучению системы подземные воды - грунт и управлению водными ресурсами AquaConSoil (г. Барселона, 2013 г.), международной ассамблее «Знание для будущего» IAHS-IAPSO-IASPEI, «Knowledge for the Future» Assembly (г. Гетеборг, 2013 г.), 53-ей, 54 - ой, 55-ой, 56-ой конференциях МФТИ (г. Москва, 2010 - 2013 гг.), семинаре Геофизической службы РАН (г.Обнинск, 2013 г.), семинарах ИДГ РАН.

Материалы диссертации опубликованы в 14 научных статьях, защищены 1 патентом полезной модели.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д.ф.-м.н. проф. Кочаряну Г.Г. за неоценимую помощь и постоянное внимание к работе; научному консультанту к.т.н. Кабыченко Н.В за помощь в работе и ценные указания при проведении исследований; к.ф.-м.н. Горбуновой Э.М. за внимание к работе, обсуждение результатов измерений, ценные рекомендации и замечания; к.ф.-м.н. Павлову Д.В., с.н.с. Волосову С.Г. за помощь в проведении экспериментальных работ и обсуждении результатов, а также всему коллективу лаборатории «Деформационные процессы в земной коре» ИДГ РАН за содействие на всех стадиях выполнения работы.

Объем и структура работы: Диссертация состоит из введения, пяти разделов и заключения, изложенных на 143 страницах, включая 67 рисунков и список литературы из 132 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, определены цели и задачи работы, сформулированы выносимые на защиту положения и новизна полученных в диссертации результатов, описана ее структура.

В первом разделе приведен краткий обзор сведений об аппаратуре, используемой при проведении сейсмических наблюдений в различных частотных диапазонах, и проанализированы основные существующие методы расширения частотных характеристик датчиков. Эти вопросы рассмотрены в работах многих отечественных и зарубежных специалистов: Л.Д. Гик, А.В. Давыдов, С.К. Дараган, Н.В. Кабыченко, К.Б. Карандеев, А.В. Рыков, Р.Р. Харченко, М.Е. Boulaenko, J. Havskov, F. Scherbaum и др. Широко применяется введение обратной связи с помощью отрицательного сопротивления, что обеспечивает большое затухание колебательной системы. Используются различные схемные реализации расширения рабочего диапазона сейсмометров с помощью обратной фильтрации.

Рассмотрен ряд актуальных задач, требующих применения методов коррекции. Так в последнее время существенное внимание уделяется мониторингу слабой сейсмичности (В.В. Адушкин, Е.Г. Бугаев, С.Б. Кишкина, А.А. Маловичко, Д.А. Маловичко, И.А. Санина, Б.Г. Пустовитенко, S. Gibowicz, G. Kwiatek, T. Urbancic и др.). Значительный вклад в части накопления экспериментальных данных, разработки методов обработки и интерпретации результатов внесли Ж.Я. Аптекман, И.П. Габсатарова, А.А. Гусев, С.К. Дараган, В.Ф. Еманов, А.И. Захарова, А.А. Маловичко, Д.А. Маловичко, Л.С. Малянова, А.В. Николаев, М.В. Невский, О.Ю. Ризниченко, М.В. Родкин, И.А. Санина, В.С. Селезнев, Л.С. Чепкунас, К. Aki, H. Kanamori, G. Purcaru, P. Richards и др. Сейсмические наблюдения проводятся на шахтах и рудниках, при мониторинге участков строительства особо ответственных сооружений, на месторождениях углеводородов и т. д. При оценке геомеханической устойчивости обследуемого участка важной задачей подобных наблюдений является корректное определение параметров источника.

Анализ показывает, что в России в практике наблюдений за слабой сейсмичностью очаговые параметры оцениваются по характеристикам низкочастотной области спектра лишь в отдельных случаях. Чаще всего по разработанным методикам оценивается энергетический класс события (логарифм сейсмической энергии), по которому затем с помощью эмпирических соотношений рассчитывается значение локальной магнитуды. На многих станциях ГС РАН и при регистрации более сильных событий сначала вычисляется класс события, а затем по корреляционным зависимостям определяется его магнитуда. В

этой связи при проведении геомеханических инженерных расчетов зачастую используют энергетический класс или локальную магнитуду для оценки физических параметров источника динамического события, что может привести к значительным ошибкам вне определенного диапазона масштаба событий. Дополнительные ошибки вносит ограниченный частотный диапазон используемых измерительных каналов.

Другим актуальным направлением является исследование длиннопериодных движений (десятки минут - часы), проявляющихся в том числе и в микросейсмическом фоне. Подобные низкочастотные импульсные сигналы, которым уделено внимание в работах ряда исследователей (Н.В. Кабыченко, Г.Г. Кочарян, Б.В. Левин, А.А. Любушин, Г.А. Соболев и др.), могут нести уникальную информацию о напряженно-деформированном состоянии крупных блоковых структур и представлять значительный интерес, например, в качестве прогностического признака сильных землетрясений. Получению экспериментальных данных в этой области будет способствовать применение методов расширения частотных характеристик измерительных каналов в области низких частот.

К сверхдлиннопериодным процессам относится гравитационное взаимодействие в системе Земля-Луна-Солнце, которое рассматривается многими специалистами (Ю.Н. Авсюк, В.В. Адушкин, С.М. Молоденский, А.А. Спивак, В.И. Уткин и др.) как важный фактор, определяющий режимы вариаций электрического поля в грунте, эманационного поля радона, уровня подземных вод, параметров поля микросейсмических колебаний и др. Совместная интерпретация приливных компонент, выделенных в сейсмических и гидрогеологических данных, позволяет проводить оценку фильтрационных свойств коллектора. Для выделения приливных составляющих в записях смещения грунта могут быть использованы методы коррекции частотных характеристик датчиков, учитывающие гравитационные свойства инерционной массы сейсмометра.

По результатам выполненного аналитического обзора в заключении первого раздела сформулированы основные направления исследований.

Во втором разделе изложен метод коррекции обратным фильтром, определен критерий применимости данного метода на основании результатов измерения характеристик исследуемых датчиков и проведенных оценок собственных шумов их измерительных каналов.

Коррекция обратным фильтром является универсальным средством уменьшения нижней граничной частоты датчика. При этом серьезной проблемой при реализации 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. Математически процесс коррекции в частотной области описывается следующим образом:

$$F_1 \cdot F_k = F_2, \quad (1)$$

где F_1 - частотная характеристика корректируемого датчика, F_k - частотная характеристика корректирующей схемы, F_2 - частотная характеристика для устройства, получаемого в результате коррекции. Общее уравнение корректирующей схемы:

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

где ω_0 - собственная частота сейсмического датчика, которую требуется понизить до $\omega_1 \ll \omega_0$, h - затухание сейсмометра, s - комплексная переменная. Корректирующий фильтр верхних частот записывается следующим образом:

$$F_{kh}(s) = \frac{s^2 + 2 \cdot h \cdot \omega_{v0} \cdot s + \omega_{v0}^2}{s^2 + 2 \cdot h \cdot \omega_{v1} \cdot s + \omega_{v1}^2} \cdot \left(\frac{\omega_{v1}}{\omega_{v0}} \right)^2, \quad (3)$$

где ω_{v0} - верхняя граничная частота сейсмометра, ω_{v1} - новая верхняя граничная частота сейсмометра.

Построение корректирующих фильтров не всегда возможно, например, в тех случаях, когда уровень шумов за пределами штатного диапазона измерительного прибора может превышать амплитуду 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. Выигрывая в частотном диапазоне, мы неизбежно проигрываем в шумовых характеристиках канала.

На основе расчета шумов измерительных каналов, содержащих сейсмические датчики, усилители и корректирующие фильтры, расширяющие частотные характеристики каналов в область низких частот, производится оценка границ применимости подобных устройств в практике сейсмических наблюдений. Основной вклад в шумы датчиков дает воздействие на маятник тепловых движений молекул воздуха. Общий электрический шум, возникающий на входах предварительного усилителя, формируется из шумового напряжения, шумового тока на входах операционного усилителя и шума Джонсона, возникающего при тепловом возбуждении электронов внутри резисторов. Схема коррекции частотной характеристики располагается обычно после предварительного усилителя, и поэтому ее шумы практически не влияют на

общий шум канала. На рис. 1 приведены спектры шумов скорректированных геофона GS-20DX и сейсмоприемника СМ-3КВ в сопоставлении с максимальным и минимальным уровнями микросейсм по модели Петерсона и спектрами реальных сейсмических событий. Также на рис. 1 представлен амплитудный спектр сигнала от промышленного взрыва 02.07.2010 в карьере ЗАО "Михайлов-цемент" (Рязанская обл.) с $M=2.5$, зарегистрированный малоапертурной группой, расположенной на территории геофизической обсерватории «Михнево» ИДГ РАН. На частотах выше 1-2 Гц сигнал от техногенного источника превышает шум откорректированного геофона, т. е. геофон GS-20DX с корректирующим устройством способен регистрировать колебания на частотах от 1 – 2 Гц до 100 - 200 Гц. К сигналам, попадающим в этот частотной диапазон, относятся сейсмические волны от промышленных взрывов и группа объемных волн от региональных землетрясений. Красным на рис.1 показан амплитудный спектр Чилийского землетрясения 27.02.2010 с $M=8.8$, зарегистрированного широкополосным сейсмоприёмником STS-2, установленным в шахте на глубине 20 м в массиве известняка. Ограничение правой ветви амплитудного спектра землетрясения обусловлено частотой дискретизации 1 Гц исходной записи. Сейсмический сигнал при землетрясениях такой силы значительно превышает уровень шума канала, включающего СМ-3КВ, усилитель и корректирующий фильтр.

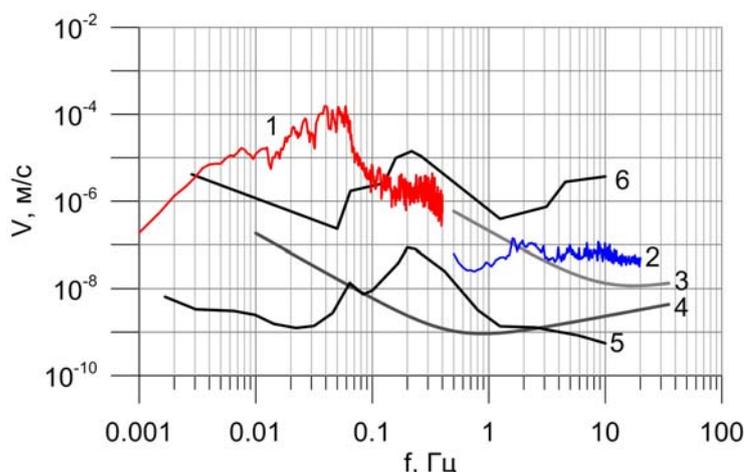


Рис. 1. Спектры двойной амплитуды скорости в полосе 1 октава: землетрясение в Чили, зарегистрированное на станции «Михнево» сейсмометром STS-2, $M=8.8$ (1); массовый взрыв на карьере «Михайлов-цемент», зарегистрированный на станции «Михнево», $M=2.5$, $R=152$ км (2); шум GS-20DX с усилителем TLE2037 после коррекции (3); шум СМ-3КВ с усилителем TLE2037 после коррекции (4); минимальный (5) и максимальный (6) уровень микросейсм по модели Петерсона [Peterson, 1993]

Описанная выше модель определения шума сейсмометра включала один основной источник шума – воздействие тепловых движений молекул воздуха на маятник. Однако собственные шумы сейсмоприемников имеют и другие источники: тепловые шумы

катушки магнитоэлектрического преобразователя, шумы элементов упругого подвеса маятника, архимедовы силы, действующие на маятник при изменениях параметров окружающей среды. Дополнительно для измерения шума канала регистрации в наших экспериментах на постаменте ИДГ РАН использовалась известная методика, в основе которой лежит регистрация одного и того же процесса двумя одинаковыми приборами, что позволило выделить квазистационарный шум в выходном сигнале датчиков. Эффективные значения шума и сигнала составляют для геофона GS-20DX $2.2 \cdot 10^{-8}$ м/с и $5.8 \cdot 10^{-7}$ м/с соответственно в полосе 1-50 Гц. Для сейсмоприемника СМ-3КВ эффективное значение шума составляет $1.7 \cdot 10^{-8}$ м/с, что на два порядка ниже уровня сейсмического фона в месте проведения измерений $1.8 \cdot 10^{-6}$ м/с в диапазоне частот 0.01-50 Гц. На основе данного метода также удалось определить нижние граничные частоты коррекции для исследуемых измерительных каналов в условиях высокого уровня сейсмического фона (г. Москва): 1 Гц для геофона GS-20DX и 0.1 Гц для сейсмометра СМ-3КВ. На более низких частотах уже невозможно выделить полезный сигнал на фоне собственных шумов датчика.

При значительном же превышении сигнала над уровнем шума (как собственного шума датчика, так и микросейсмического фона) измерения АЧХ и ФЧХ датчиков на вибростенде показали, что частотные характеристики геофона GS-20DX могут быть расширены до 0.5 Гц, а сейсмометра СМ-3КВ – до 0.01 Гц в область низких частот.

Описанные методы коррекции АЧХ не будут эффективны для выделения сверхнизкочастотных сигналов с периодами десятки часов (лунно-солнечные приливы). Коррекция обратным фильтром в данном случае лишь приведет к значительному повышению уровня шума. Для выделения колебаний на приливных частотах можно использовать метод А.В. Рыкова, учитывающий гравитационные свойства инерционной массы сейсмометра. Например, чувствительность сейсмометра STS-2 на частотах приливных волн ($1.16 \cdot 10^{-5}$ - $2.31 \cdot 10^{-5}$ Гц) удастся повысить с $2.9 \cdot 10^{-3}$ – $12 \cdot 10^{-3}$ В/м/с до 1.72 В/м/с, что позволяет определить скорость смещения грунта в приливных волнах.

Третий раздел посвящен апробации в полевых условиях отработанного метода коррекции частотных характеристик сейсмометров. Анализ результатов регистрации проводился для сигналов различной природы и интенсивности: микросейсмического шума, промышленных взрывов, землетрясений.

Для расширения диапазона регистрации датчика GS-20DX (собственная частота 10 Гц) некоторые точки малоапертурных групп «Михнево», оборудованные сейсмометрами СМ-3КВ (собственная частота 0.5 Гц), и «Монаково», оснащенные

датчиками REFTEK 151-30 (собственная частота 0.033 Гц) были дополнены геофонами. Проводилась регистрация промышленных взрывов, последующая обработка записей и сравнение возможностей регистрации датчика GS-20DX с расширенной частотной характеристикой и сейсмометров СМ-3КВ и REFTEK 151-30 (в дальнейшем будем их называть эталонными). На рис. 3 представлены сейсмограммы и соответствующие спектры от взрыва 01.12.2011 на Новогуровском карьере, отфильтрованные в полосе частот 5-9 Гц, зарегистрированные сейсмометром СМ-3КВ, геофоном GS-20DX и геофоном GS-20DX с частотной характеристикой, расширенной до 3 Гц. Восстановленный спектр сигнала, зарегистрированного геофоном, совпадает со спектром сигнала, записанного сейсмометром СМ-3КВ (рис. 3), что наглядно демонстрирует работу метода коррекции. Однако имеет место запаздывание скорректированного сигнала геофона (красная линия на рис. 3) относительно сейсмограммы СМ-3КВ (синяя линия на рис. 3). 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, в случае малоапертурной группы «Михнево», и REFTEK-151-30 для группы «Монаково».

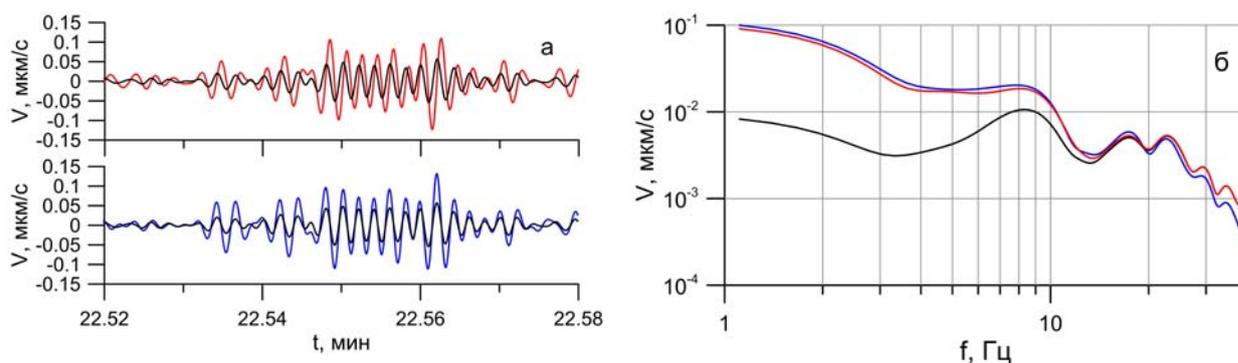


Рис. 3. Сигналы (а) и соответствующие спектры (б) от взрыва 01.12.2011 на Новогуровском карьере в частотном диапазоне 5-9 Гц, зарегистрированные: геофоном GS-20DX (черная линия); сейсμοприемником СМ-3КВ (синяя линия); геофоном GS-20DX с расширенной частотной характеристикой до 3 Гц (красная линия)

Исследование ФЧХ измерительных каналов, состоящих из датчика и усилителя, проводилось на вибростенде «ПСВУ». Полученная лабораторная зависимость запаздывания скорректированного геофона относительно СМ-3КВ и REFTEK-151-30 (красная и синяя линия на рис. 4) дополнена результатами обработки записей промышленных взрывов (значки на рис. 4). Фазовая задержка между записями, зарегистрированными скорректированным геофоном и эталонными датчиками, 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. 4 соответствуют запаздыванию геофона с расширенной частотной характеристикой относительно эталонных сейсмометров. При частоте опроса 200 Гц ошибка в 20 градусов будет составлять от 1 до 3 отсчетов в диапазоне частот 4-12 Гц.

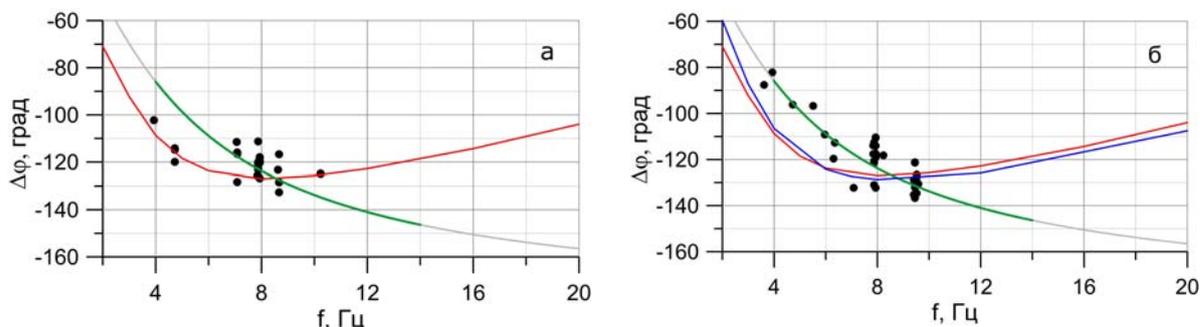


Рис. 4. Разница ФЧХ каналов: геофона с учетом коррекции до 3 Гц и сейсмометра СМ-3КВ (а), полученная по результатам измерений на вибростенде (красная линия); геофона с учетом коррекции до 3 Гц и датчика REFTEK-151-30 (б), полученная по результатам измерений на вибростенде (синяя линия). Значки – экспериментальные результаты, полученные при обработке сейсмограмм промышленных взрывов. Серая линия – аппроксимация полученных зависимостей фазовым фильтром с параметром $\tau = 0.037$ с. Зеленым отмечен участок на ФЧХ фазового фильтра в интервале частот 4-14 Гц.

Для того чтобы учесть фазовое запаздывание геофона без изменения амплитуды сигналов, следует использовать фазовый фильтр (серая линия на рис. 4) с АЧХ равной единице во всем диапазоне частот:

$$H_1(s) = \frac{-\tau s + 1}{\tau s + 1}, \quad (4)$$

где τ – параметр фазового фильтра. Сейсмограммы (рис. 5) наглядно демонстрируют, что введение фазового фильтра позволяет удалить опережение СМ-3КВ относительно геофона.

Результаты выполненных исследований указывает на то, что малогабаритные геофоны с скорректированными частотными характеристиками могут заменить крупногабаритные и более дорогие сейсмоприемники, например, СМ-3КВ и REFTEK-151-30 в диапазоне частот 4-14 Гц при проведении сейсмического мониторинга в платформенных условиях.

Метод численной коррекции может найти применение и для короткопериодных датчиков типа СМ-3КВ, которые широко используются при наблюдениях локальной и региональной сейсмичности. Оценка возможности расширения частотной характеристики датчика СМ-3КВ проводилась как для квазистационарных сигналов (микросейсмический фон), так и для волн удаленных сильных землетрясений.

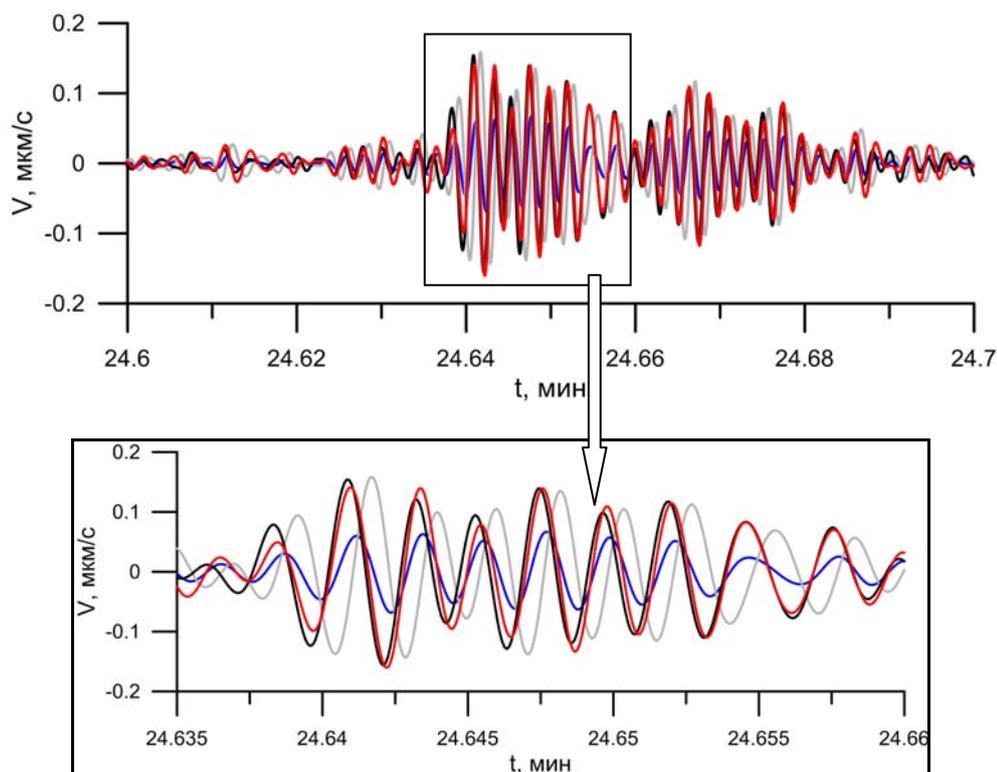


Рис. 5. Сейсмограммы промышленного взрыва 09.07.2013 на карьере вблизи г. Елец Липецкой области в полосе 4-8 Гц, зарегистрированные: сейсмометром СМ-3КВ (черная линия), геофоном GS-20DX (синяя линия), геофоном GS-20DX после коррекции (серая линия), геофоном GS-20DX после коррекции и применения фазового фильтра (красная линия)

Действие метода коррекции рассматривалось на сильных землетрясениях, произошедших в 2013 году, с магнитудой $m_b > 7$. В выборку вошли следующие события: землетрясение в Пакистане 16.04.2013 с $M_w = 7.7$, на Курильских островах 19.04.2013 с $M_w = 7.3$ и землетрясение в Охотском море 24.05.2013 с $M_w = 8.3$. Для указанных событий с помощью метода коррекции удалось восстановить группу поверхностных волн на записи сейсмометра СМ-3КВ. Дополнительно рассматривалось катастрофическое землетрясение Тохоку, произошедшее 11.03.2011 с $M_w = 9.1$. Анализировалась группа поверхностных волн, зарегистрированная сейсмометром СМ-3КВ, входящим в малоапертурную группу, расположенную на территории геофизической обсерватории «Михнево» ИДГ РАН, и широкополосным сейсмоприёмником СМ-3-Д, установленном в шахте на глубине 20 м. На рис. 6 представлены откорректированные сейсмограммы СМ-3КВ до новой нижней граничной частоты 0.01 Гц и сейсмограммы, зарегистрированные СМ-3-Д. Обе записи профильтрованы в диапазоне частот 0.05-2 Гц.

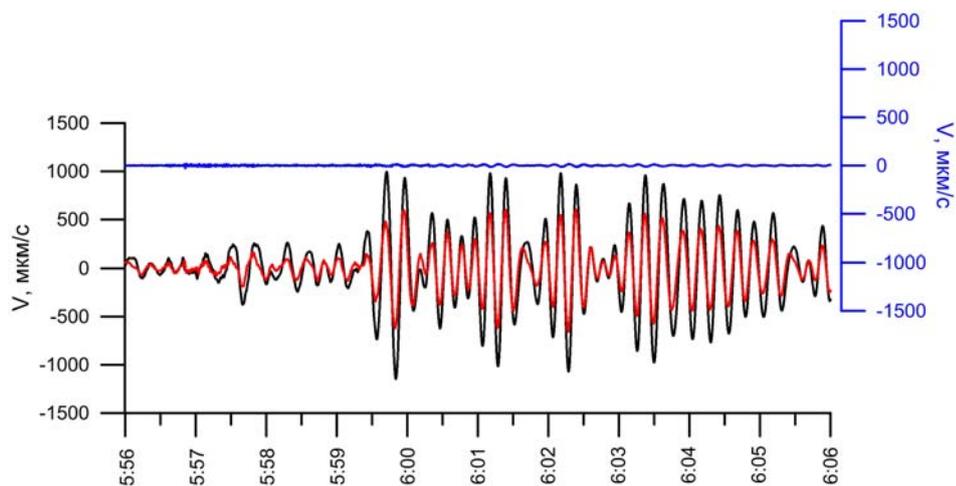


Рис. 6. Поверхностные волны от землетрясения 11.03.2011 в частотном диапазоне 0.05-2 Гц, зарегистрированные: СМ-3КВ (синяя линия); СМ-3-Д (черная линия); СМ-3КВ с расширенной частотной характеристикой до 0.01 Гц (красная линия). По оси абсцисс отложено время (GMT)

Обработка данных регистрации волн от землетрясений и результаты моделирования шума измерительного канала СМ-3КВ позволяют сделать вывод о границах применимости метода коррекции для подобных датчиков. На рис. 7 представлен уровень собственных шумов измерительного канала СМ-3КВ (зеленая линия) в сопоставлении со спектром микросейсмического фона в Михнево (синяя линия).

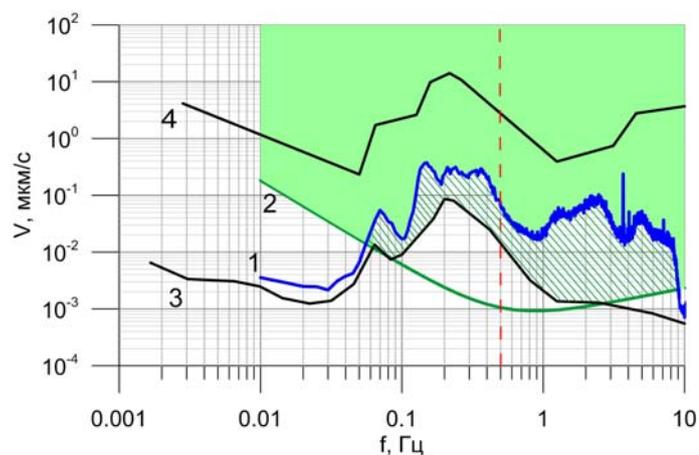


Рис. 7. Спектр двойной амплитуды скорости в полосе 1 октава: (1) уровень микросейсмического фона, измеренный STS-2 на станции «Михнево»; (2) шум СМ-3КВ после коррекции; (3, 4) минимальный и максимальный уровень микросейсм по модели Петерсона; красная пунктирная линия соответствует собственной частоте датчика СМ-3КВ и разделяет рабочую полосу сейсмометра и диапазон, расширенный с помощью коррекции

Фоновые микросейсмы с амплитудами скорости и частотами, попадающими в заштрихованную область, а также сейсмические сигналы с соответствующими параметрами из области с зеленой заливкой удовлетворяют условиям применимости метода коррекции сейсмометра СМ-3КВ. Для них уровень полезного сигнала будет

превышать уровень инструментального шума измерительного канала, а при регистрации сейсмических сигналов и уровень микросейсмического фона.

При проведении мониторинга слабой сейсмичности чаще всего инструментально определяются значения энергетического класса K_E и магнитуд M_L и m_b , от которых затем переходят к значениям магнитуд M_w и M_s . При проведении измерений на горнодобывающих предприятиях величина K_E часто определяется по длительности записи. **В четвертом разделе** на основе моделирования излучения сейсмического источника проводится оценка возможных ошибок, возникающих при расчете геомеханических параметров очагов слабых динамических событий с помощью методов, применяемых в практике наблюдений.

Для проведения расчетов была использована известная модель Брюна, которая описывает характеристики сигнала, излучаемого при внезапном сбросе напряжения на круговой поверхности в упругом изотропном пространстве. Для этой модели спектр скорости смещения грунта на расстоянии R от источника $\dot{\Omega}(s)$ записывается в соответствии с передаточной функцией

$$\dot{\Omega}(s) = \frac{1}{\Psi^2 \Phi 4\pi \rho C_s^3 R} \frac{M_0 \omega_0^2 s}{(s + \omega_0)^2}, \quad (5)$$

где Ψ — коэффициент, учитывающий направленность излучения; Φ — коэффициент, определяемый углом выхода луча на свободную поверхность; ρ — плотность; C_s — скорость поперечных волн; R — расстояние от источника до точки наблюдения; s — комплексная переменная при преобразовании Лапласа; $\omega_0 = 2\pi f_0$, f_0 — угловая частота спектра излучения; величина сейсмического момента M_0 , как известно, может быть рассчитана по результатам измерений параметров низкочастотной области спектра сейсмических колебаний:

$$M_0 = \Psi^2 \Phi 4\pi \rho C_s^3 R \Omega_0, \quad (6)$$

Ω_0 — амплитуда “полки” в низкочастотной части спектра смещения. Затухание сейсмических колебаний с расстоянием в первом приближении может быть учтено путем умножения амплитудного спектра на сомножитель $\exp(-\pi R f / Q C_s)$, где Q — эффективная добротность среды.

По приведенным соотношениям были рассчитаны волновые формы на различных расстояниях от модельного источника с заданным сейсмическим моментом. Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными продемонстрировало разумное соответствие.

На основе рассчитанных эпюр скорости смещения грунта определялись значения магнитуды m_b и энергетического класса Т.Г. Раутиан. Полученные значения магнитуд сопоставлялись с заданным значением момента M_0 или моментной магнитуды M_w , т. е. с “истинными” параметрами сейсмического источника.

Для определения магнитуды m_b использовалось соотношение

$$m_b = \zeta \lg(V_{\max} / 2\pi) + Q(\Delta, h) - \alpha, \quad (7)$$

где V_{\max} — скорость смещения грунта, нм/с; $Q(\Delta, h)$ — калибровочная функция; Δ — эпицентральный расстояние; h — фокальная глубина, км; α — станционная поправка. Коэффициент ζ чаще всего принимают равным 1. Из соотношения (7), которое обычно используется на практике для определения магнитуды землетрясения, легко видеть, что для событий с магнитудами m_{b1} и m_{b2} должно выполняться соотношение

$$m_{b1} - m_{b2} = \zeta \lg\left(\frac{V_{\max 1}}{V_{\max 2}}\right). \quad (8)$$

Без ограничения общности дальнейших рассуждений при рассмотрении слабых событий ($M_w \leq 2$) можно принять в наших расчетах землетрясение с $M_0 = 1.2 \cdot 10^{15}$ Н·м ($M_w = 4$) в качестве эталона в том смысле, что для него выполняется соотношение $M_w = m_b$. В самом деле, угловая частота спектра излучения для такого землетрясения составляет 1.5–2 Гц, поэтому можно полагать, что на близких расстояниях такое предположение в первом приближении справедливо. Это делается для того, чтобы m_b для других событий отсчитывать от этого “эталона”, используя соотношение (8) и избегая тем самым использования поправок $Q(\Delta, h)$ и α . В расчетах принято $\zeta = 1$.

Расчет величины энергетического класса K_E производился по соотношению

$$K_E = 1.84(\lg(A_P + A_S) + 1.92 \lg(R) + 1.54), \quad (9)$$

где A_P и A_S — амплитуды P - и S -волн, мкм; R — расстояние от источника, км. В свою очередь магнитуда может быть оценена при помощи выражения

$$M_E = \frac{K_E - 4}{1.8}, \quad (10)$$

которое применяется для многих регионов бывшего СССР. При использовании в расчетах соотношения (9) принято, что $A_P \ll A_S$.

Результаты расчетов для слабых событий с $-1 \leq M_w \leq 2$ показаны на рис. 8 в виде зависимости разности $(M - M_w)$ от расстояния. На ближних расстояниях магнитуда,

рассчитанная непосредственно по максимальной скорости смещения грунта, даже превышает значение M_w . Это связано с тем, что на близких эпицентральных расстояниях в соотношении (8) величина $\zeta < 1$. По мере увеличения расстояния магнитуда, определенная по параметру V_{\max} , становится все более “недооцененной” по сравнению с моментной (черные линии на рис. 8).

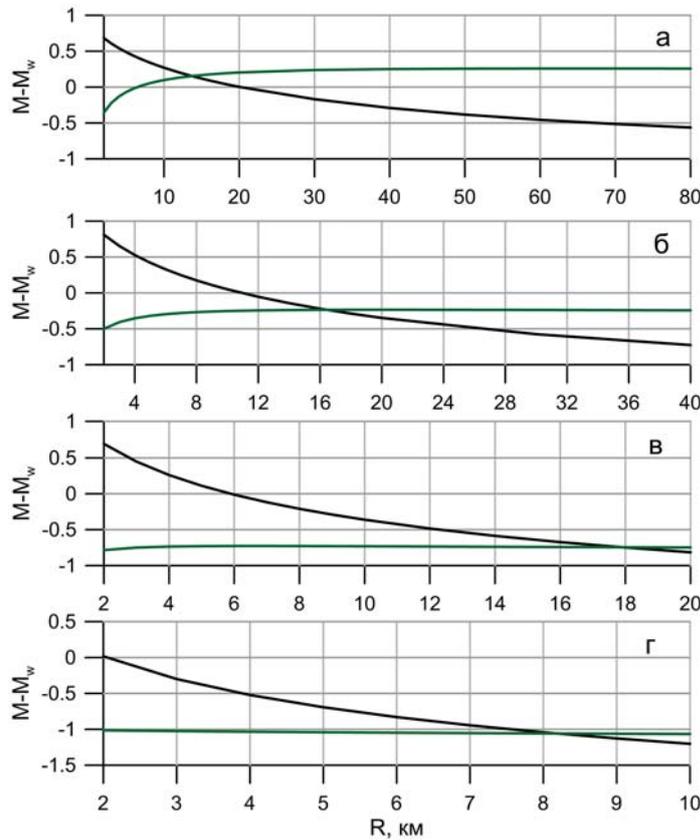


Рис. 8. Зависимости от расстояния разности расчетной и моментной магнитуд слабых событий:

а — $M_0 = 1.2 \cdot 10^{12}$ Н·м ($M_w = 2$);

б — $M_0 = 4 \cdot 10^{10}$ Н·м ($M_w = 1$);

в — $M_0 = 1.2 \cdot 10^9$ Н·м ($M_w = 0$);

г — $M_0 = 4 \cdot 10^7$ Н·м ($M_w = -1$).

Параметры среды:

для а–в - $Q = 200$, $C_s = 3500$ м/с;

для г - $Q = 100$, $C_s = 2000$ м/с.

Черная линия — величины m_b определены по значению V_{\max} (8),

зеленая линия — величины M_E определены по рассчитанным значениям энергетического класса событий K_E (9)

При этом если для землетрясения с $M_w = 2$ разность ($M - M_w$) становится существенной (~ -0.5) на расстоянии 50–60 км, то для события с $M_w = 0$ это происходит уже на расстоянии около 10–12 км от источника. Обычный в практике сейсмологических наблюдений разброс в определении магнитуды, равный 0.5, приводит к почти двукратной ошибке в оценке размеров источника, что весьма существенно при проведении мониторинга территорий расположения ответственных инженерных объектов, подземных сооружений, рудников и т. д.

Наиболее приемлемой для событий с $M_w \sim 1-2$ выглядит оценка магнитуды по энергетическому классу, хотя и в этом случае для событий с $M_w \leq 0$ “недооценка” физических характеристик источника становится значительной (зеленые линии на рис. 8).

Дополнительные погрешности при оценке характеристик очага может вносить ограниченный частотный диапазон датчика, поскольку спектр слабых событий

оказывается весьма высокочастотным. Применение метода коррекции в большинстве случаев позволяет учесть этот эффект.

Метод коррекции может применяться также и к записям широкополосных датчиков для оценки характеристик блоковой среды. Исследование параметров микросейсмического фона в низкочастотной области проводилось на станции ГФО «Михнево», оборудованной широкополосным сейсмометром КСЭШ-Р. Движение грунта в диапазоне периодов 40-330 с характеризуется чередованием квазистационарных процессов и ярко выраженных импульсных всплесков. Нестационарные участки представляют собой импульсные колебания с характерными периодами 1-1.2 мин преимущественно асимметричной формы. Период повторения самих импульсов составляет 5-7 мин. Проведенные оценки показывают, что подобные импульсные сигналы могут соответствовать колебательным движениям блоков, разделенных слоями с пониженной жесткостью – разломными зонами. При этом по мере приближения к метастабильному состоянию характерный период системы блок – «прослойка» может смещаться в низкочастотную часть спектра микросейсмического шума. Подобный эффект наблюдался как в натурных измерениях (Г.А. Соболев, А.А. Любушин), так и в лабораторных экспериментах (Г.Г. Кочарян, А.А. Остапчук) и может оказаться удобным индикатором возникновения неустойчивости при проведении сейсмологических исследований.

Если на записях сверхширокополосного сейсмометра КСЭШ-Р колебания в диапазоне сверхнизких частот выделяются простой фильтрацией, то для выделения подобных сигналов на сейсмометрах типа STS-2 необходимо использовать специальные методы коррекции.

В пятом разделе изложены результаты совместного анализа данных сейсмических и гидрогеологических наблюдений на ГФО «Михнево», проведено исследование приливного отклика среды, и выполнена оценка вариаций проницаемости коллектора подземных вод.

Синхронные наблюдения за состоянием флюидонасыщенного коллектора, микросейсмическим фоном и атмосферным давлением проводились на территории геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево». В наблюдательной скважине с использованием датчика LMP 308i (Германия) велись прецизионные наблюдения (точность 0,1 мм, интервал опроса 1 с) за уровнем напорного алексинско-протвинского водоносного горизонта нижнего карбона, вскрытого в интервале 92-115 м. Регистрация сейсмических данных осуществлялась широкополосным сейсмометром STS-2,

расположенным в шахте на глубине 20 м. На поверхности размещалась цифровая метеостанция (Vontage Pro-2).

Первичная обработка экспериментальных данных позволяет выделять из вариаций уровня воды барометрическую и приливную составляющие, а также приливные волны в смещении грунта с помощью методики, изложенной в разделе 2. Дополнительно рассчитывались теоретические смещения грунта в приливных волнах флюидонасыщенного коллектора применительно к координатам сейсмической станции «Михнево» с использованием программного пакета ETERNA.

Выполненный Фурье анализ рядов данных атмосферного давления, уровня воды, очищенного от барометрического влияния, и теоретического значения смещения грунта позволил выделить на спектрах уровня подземных вод и теоретического смещения грунта 8 типов приливных волн - суточные Q_1 , O_1 , K_1 , P_1 и полусуточные N_2 , M_2 , S_2 , K_2 . На амплитудном спектре атмосферного давления присутствует только одна приливная волна лунно-солнечного типа S_2 .

В рассматриваемых данных выделены участки (1-3 на рис. 9), в пределах которых прослеживается расхождение в формах огибающих между экспериментальными и теоретическими значениями приливов в смещении грунта, наиболее значимо выраженные в полусуточной приливной компоненте. Фрагментарное «искажение» сигнала может быть связано с влиянием дополнительных факторов. Четко прослеживается отклик среды на землетрясение Тохоку 11.03.2011 г. (участок 1, рис. 9). Ослабление сигнала на отрезке со 2 по 6 апреля 2011 г. (участок 2, рис. 9) приурочено к периоду максимальной рассинхронизации интенсивности полусуточных и суточных приливных волн и переходу среднесуточной температуры воздуха через 0^0 . С 26 апреля по 6 мая 2011 г. (участок 3, рис. 9) прослежен период интенсивного подъема уровня поверхности верхнего водоносного горизонта в интервале 26-25.5 м и значимого повышения температуры воздуха на 10^0 .

Огибающие приливных компонент в уровне подземных вод имеют асимметричную форму. Максимальное значение амплитуды полусуточной приливной компоненты в уровне подземных вод отмечается с запаздыванием на месяц в апреле 2011 г. относительно максимального значения полусуточной приливной компоненты, выделенной в смещении грунта, в марте 2011 г. По суточной компоненте увеличение амплитуды приливных волн в уровне подземных вод и смещении грунта прослеживается в январе и мае 2011 г. С 26 апреля по 20 мая 2011 г. вклад волны лунного типа O_1 в формирование суточной приливной компоненты в уровне подземных вод ГФО «Михнево» не прослеживается (рис. 10,б). Наличие подобных (аномальных) участков,

предположительно, свидетельствует о дополнительном влиянии гидрогеодинамического фактора на формирование приливного отклика в подземных водах ГФО «Михнево». Отклик на землетрясение Тохоку 11 марта 2013 г. в приливных компонентах уровня подземных вод выражен слабо (рис. 10).

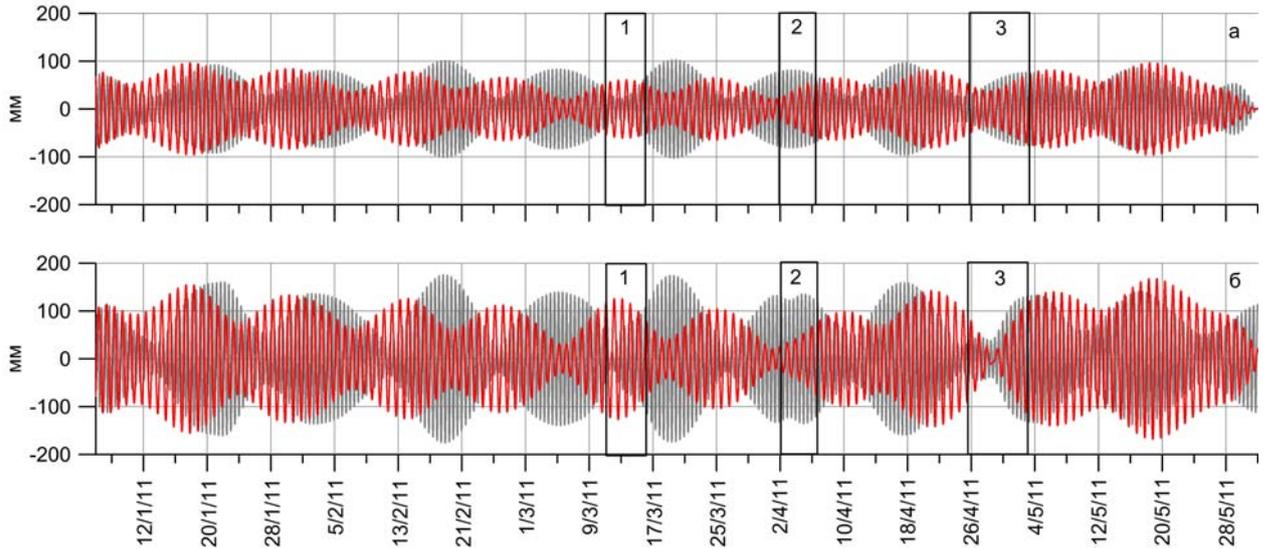


Рис. 9. Вариации приливной компоненты в смещении грунта, рассчитанной по программе ETERNA (а) и по результатам регистрации STS-2 (б) (черная линия – полусуточная приливная компонента, красная линия – суточная приливная компонента)

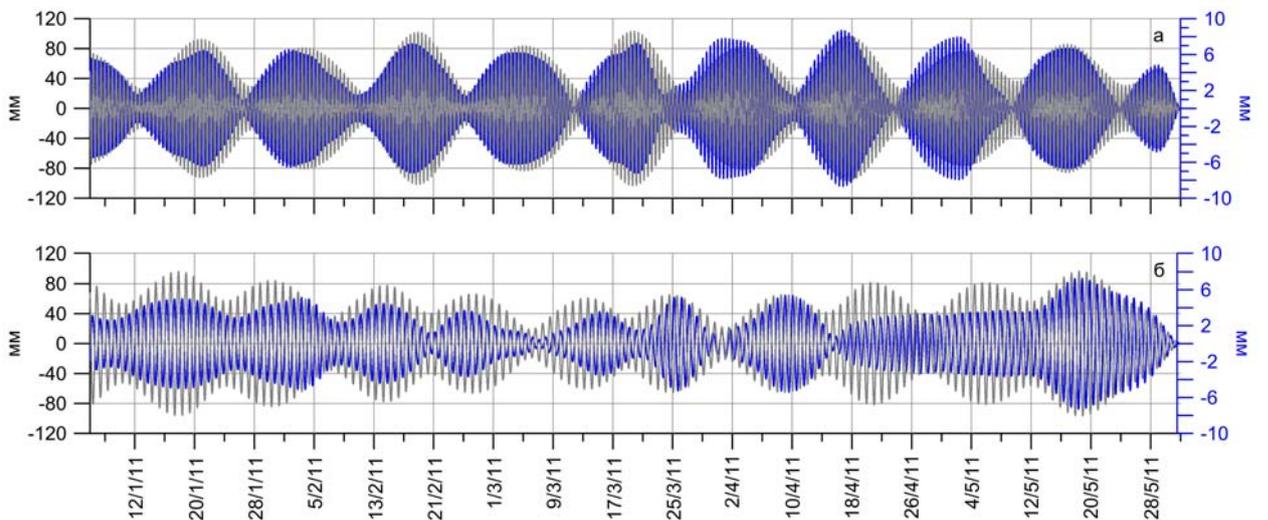


Рис. 10. Вариации полусуточной (а) и суточной (б) приливных компонент в уровне (синяя линия) и смещении грунта, рассчитанном по программе ETERNA (серая линия)

Анализ годовых циклов основных типов приливных волн показал, что волны лунного типа менее зависимы от влияния внешних факторов, более устойчивы и могут рассматриваться в качестве зондирующих сигналов для контроля состояния массива горных пород.

Определение проницаемости коллектора проводилось на основе анализа приливной волны лунного типа M_2 в сейсмических и гидрогеологических данных. Для этого производилась оценка фазового сдвига уровня воды относительно смещения грунта для интервалов с квазистационарным режимом фильтрации подземных вод и участков, которые характеризуются понижением урвенной поверхности. В расчетах выполнялась оценка водопроводимости с учетом конструкции скважины, упругой емкости водовмещающих пород, фазового запаздывания уровня воды относительно смещения грунта.

Визуализация огибающих приливов, выделенных по экспериментальным данным, и рассчитанных теоретически, позволяет выделять участки, характеризующиеся осложнением форм приливных компонент в смещении грунта и уровне воды, которые необходимо исключать из рассмотрения при оценке фильтрационных свойств коллектора.

Большому запаздыванию уровня воды относительно приливных колебаний в смещении грунта соответствуют пониженные значения водопроводимости, а значит, и проницаемости пласта. Проницаемость, рассчитанная на интервалах с квазистационарным режимом фильтрации, составляет 200-600 мД и совпадает с данными, полученными при проведении откачек скважины. Участки нестационарной фильтрации характеризуются низкими значениями проницаемости 10-60 мД, вероятно, в связи с влиянием дополнительных факторов.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. В результате выполненных исследований научно обоснован метод программной коррекции волновых форм с целью расширения рабочего диапазона частот сейсмических датчиков.

2. В результате лабораторных и полевых экспериментов, проведенных исследований АЧХ и ФЧХ датчиков, а также моделирования шумов измерительных каналов, определены границы применимости метода.

3. Установлено, что в условиях уровня сейсмического шума, характерного для малонаселенной местности (~ 0.01 мкм/с в диапазоне частот 1-10 Гц), рабочий диапазон GS-20DX можно расширить до 3 Гц при условии, что амплитуда сигнала больше 0.05 мкм/с.

4. Показано, что с помощью предлагаемого метода рабочая полоса частот короткопериодных сейсмометров СМ-3КВ может быть расширена до 0.01 Гц при регистрации сейсмических колебаний с амплитудами выше, чем 0.3 мкм/с, что позволяет использовать его в качестве широкополосного прибора.

5. На основании модельных расчетов оценены количественные поправки к геомеханическим характеристикам очагов слабых событий, определяемым по измеренным значениям энергетического класса и магнитуды m_b . Показано, что ошибки, которые возникают из-за радикального искажения излучаемого спектра в результате поглощения высоких частот, становятся значимыми уже на расстоянии 1-3 км. Дополнительные погрешности может вносить ограниченный частотный диапазон измерительного канала, однако отработанный метод коррекции зарегистрированных сейсмограмм позволяет практически полностью восстановить истинные значения движения грунта.

6. Коррекция волновых форм, выполненная на основе учета гравитационных свойств инерционной массы датчика, позволяет использовать широкополосные сейсмометры для анализа волновых процессов в диапазоне сверхнизких периодов (ниже 0.00028 Гц). По результатам синхронных сейсмических и гидрогеологических наблюдений впервые в платформенных условиях проведено исследование приливного отклика среды и выполнена оценка вариаций проницаемости флюидонасыщенного карбонатного коллектора трещинно-порового типа.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. *Беседина А.Н., Кабыченко Н.В.* Исследование сейсмических колебаний в длиннопериодной части спектра // Труды МФТИ. - 2011. - №3. - Т. 3. - С. 14-19.
2. *Беседина А.Н., Кабыченко Н.В., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В.* Коррекция частотных характеристик сейсмических датчиков и шумов соответствующих измерительных каналов // Сейсмические приборы. - 2011. - №2. - Т. 47 - С. 11-20.
3. *Кабыченко Н.В., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В., Беседина А.Н.* Об оценке смещения и деформации в приливных волнах по цифровым записям сейсмометров STS-2 и КСЭШ-Р // Сейсмические приборы. - 2011. - №3. - Т. 47. - С. 13-18.
4. *Беседина А.Н., Кабыченко Н.В., Кочарян Г.Г.* Особенности сейсмического мониторинга слабых динамических событий в массиве горных пород // ФТПРПИ. – 2013. - № 5. - С. 20-36.

Публикации в других изданиях

5. *Беседина А.Н., Кабыченко Н.В., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В.* Численная коррекция сейсмограмм и шумов измерительного канала. – Динамические процессы в геосферах: сборник научных трудов ИДГ РАН. - М.: ГЕОС. 2011. - С.100-108.
6. *Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Кабыченко Н.В., Свинцов И.С.* Исследование приливов в геофизических полях, регистрируемых на территории геофизической обсерватории «Михнево». – Динамические процессы в геосферах. Выпуск 3: сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: Геос. 2012. – С.99-107.
7. *Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Кабыченко Н.В., Свинцов И.С.* Исследование приливов по гидрогеологическим и сейсмическим записям ГФО «Михнево». – Динамические процессы в геосферах. Выпуск 4: сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: Геос. 2013. - С. 174-184.
8. *Беседина А.Н., Волосов С.Г., Кабыченко Н.В., Кочарян Г.Г.* Исследование частотных характеристик при коррекции сейсмограмм на примере геофона GS20DX. –

Динамические процессы в геосферах. Выпуск 4: сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: Геос. 2013. – С. 157-163.

9. *Беседина А.Н., Кочарян Г.Г., Пронюк О.А.* Масштабный эффект при мониторинге слабой сейсмичности. – Динамические процессы в геосферах. Выпуск 4: сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: Геос. 2013. – С. 78-88.
10. *Пигулевский П.И., Свистун В.К., Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Свинцов И.С.* О гидрогеологических откликах подземных вод Украинского и Московского массивов на катастрофические землетрясения // Геодинамика. 2013. №2 (15). С.280-282. (Материалы международной научной конференции. Львов, 2013).
11. *Besedina A.N., Vinogradov E.A., Kabychenko N.V., Gorbunova E.M., Svintsov I.S.* Monitoring of tidal variations in the seismic and hydrogeological data collected on East European Plate // European Seismological Commission 33rd General Assembly "Seismology without boundaries". Moscow. 19-24 August, 2012. PP. 242-243.
12. *Besedina A.N., Vinogradov E.A., Gorbunova E.M., Kabychenko N.V., Svinzov I.S.* Tidal dynamic in geophysical fields. 16-19 April, 2013. Barselona. Spain. www.aquaconsoil.org/AquaConSoil2013/Procs_Theme_C_files/ThS_C2_Poster.pdf, 2289paper_long.pdf. P. 1-10.
13. *Vinogradov E.A., Besedina A.N., Gorbunova E.M.* Tidal impact on geophysical fields registered in GPO "Mikhnevo" area. EGU General Assembly 2013, held 7-12 April, 2013 in Vienna, Austria, id. EGU2013-3881.
14. *Besedina A.N.* Estimation of errors of small events magnitudes calculations. IAHS IAPSO IASPEI, «Knowledge for the Future» Assembly, July 22 - 26, 2013, Gothenburg, Sweden, Abstract number S301S2.07.

Патенты

15. *Кабыченко Н.В., Беседина А.Н., Павлов Д.В.* Патент полезной модели «Устройство для коррекции частотной характеристики датчика» № 2011119205/28 МПК G01V/00(2006.01) 13.05.2011.