

УДК 550.34.016

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕТЕКТОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ОТ БЛИЗКОРАСПОЛОЖЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ДАННЫМ МАЛОАПЕРТУРНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ “МИХНЕВО”

© 2013 г. И.А. Санина, М.А. Нестеркина, Н.Л. Константиновская,  
Э.М. Горбунова

*Институт динамики геосфер РАН, г. Москва, Россия*

Среди слабых сейсмических сигналов особое место занимают имеющие разный генезис импульсы длительностью от 1–2 до 8–10 с. Как правило, большинство исследований направлено на анализ природных сигналов, связанных с проявлением естественной активности отдельных блоков земной коры; при этом часто к природным ошибочно относят техногенные из-за сходства их параметров – длительности, частотного состава и т.п.

Представлены результаты выделения среди всех импульсов, регистрируемых при наблюдениях на малоапертурной сейсмической антенне “Михнево”, техногенных сигналов от источников, расположенных на поверхности (передвигающиеся автомашины, работающие агрегаты и т.п.) и на глубине (бурение скважины до 46 м).

Отдельно рассмотрены сигналы внешнего (экзогенного) происхождения, связанные с проходящим грозovým фронтом, которые также могут быть ошибочно отнесены к тектоническим.

**Ключевые слова:** малоапертурная сейсмическая антенна, импульсный сигнал, техногенные помехи, спектральный состав.

### Введение

Расположенная на территории Геофизической обсерватории Института динамики геосфер РАН (ГФО “Михнево”) в 80 км к западу от Москвы малоапертурная сейсмическая антенна<sup>1</sup> “Михнево” (рис. 1) ежегодно регистрирует около 5000 событий, связанных как с естественной, так и с техногенной активностью. Распознаванию событий разного генезиса – техногенного, природно-техногенного, природного – в последние годы посвящено немало публикаций [Годзиковская, Бесстраинов, Лабзина, 2000; Годзиковская, 2011; Землетрясения..., 2007; Маловичко и др., 2012]. Однако авторам неизвестны работы, в которых решалась бы задача первоначального исключения из общего числа зарегистрированных импульсов событий техногенной природы.

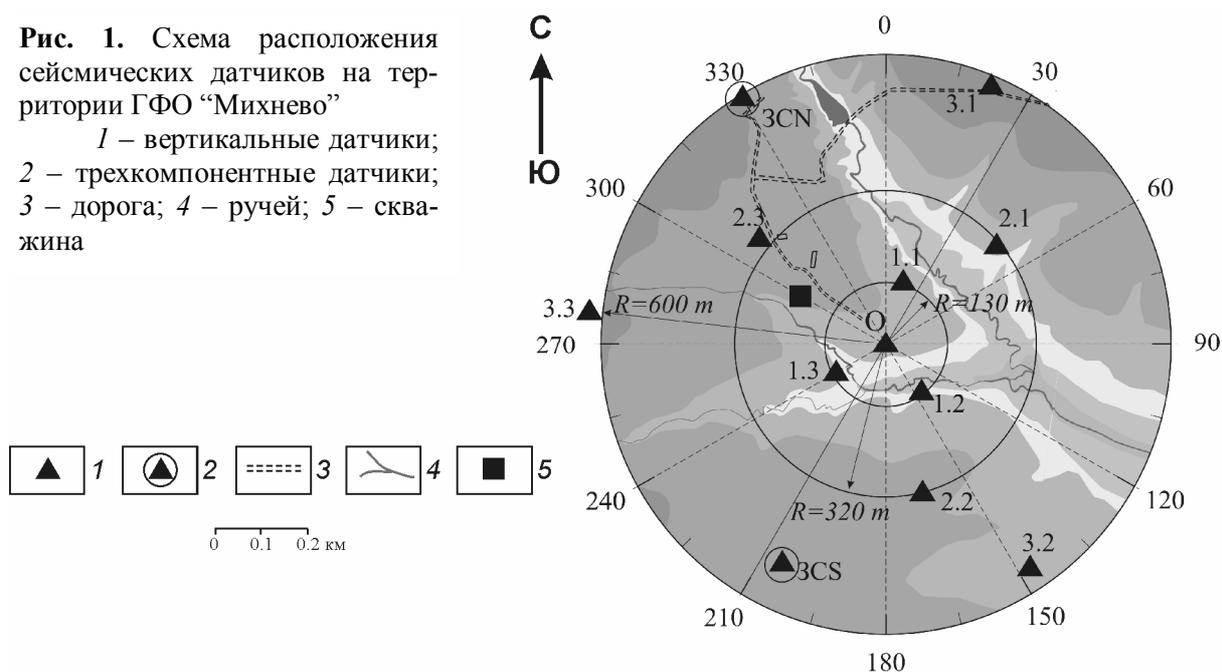
Наибольшую трудность представляют локация и определение природы сигналов от близко расположенных источников малой магнитуды [Санина и др., 2009]. Как правило, эти сигналы характеризуются импульсной формой и преимущественно поверхностными волнами; их лоцирование известными методами по разности вступления *P*- и *S*-волн не представляется возможным.

Разработка методов идентификации подобных событий – одна из актуальных задач при выделении межблоковых границ в земной коре, разработке месторождений полезных ископаемых (включая углеводороды), мониторинге площадок размещения особо ответственных объектов, а также для территорий с преобладанием карстовых процессов, которые широко развиты в пределах центральной части Восточно-Европейской платформы.

<sup>1</sup> В русскоязычной литературе вместо термина “антенна” часто используется “группа”.

**Рис. 1.** Схема расположения сейсмических датчиков на территории ГФО “Михнево”

1 – вертикальные датчики;  
2 – трехкомпонентные датчики;  
3 – дорога; 4 – ручей; 5 – скважина



С момента создания в 2004 г. МСА “Михнево” началось формирование банка типичных волновых форм от техногенных событий различного происхождения, в том числе от карьерных взрывов [Санина и др., 2012]. Цель данного исследования – идентификация однотипных сигналов импульсной формы на основе многолетних наблюдений и имеющихся сведений об их источнике.

### Методика обработки результатов наблюдений на МСА “Михнево”

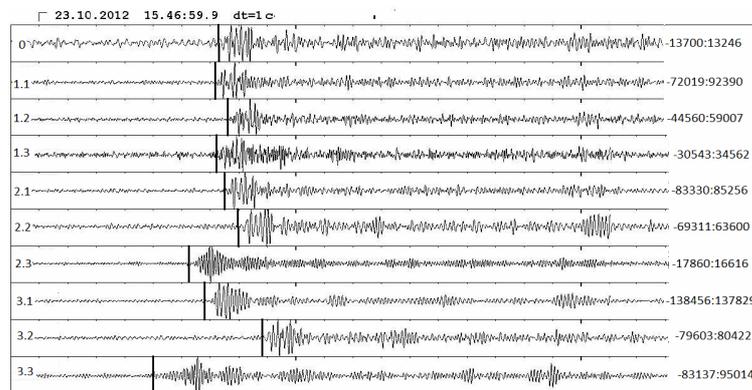
Авторами использовались данные наблюдений на МСА “Михнево” в 2012 г. Из 4000 событий для анализа было отобрано около 500, зарегистрированных не менее чем 5 датчиками группы. Сигналы, записанные меньшим числом датчиков, в обработку не включались, что связано с двумя причинами. Во-первых, регистрация времени вступления не менее чем 4–5 датчиками необходима для получения устойчивого результата при определении азимута на источник с использованием программы *ELWIN*<sup>1</sup> [Асминг, 2004]. Во-вторых, регистрация события пятью и более датчиками свидетельствует о наличии именно сигнала, а не какой-либо локальной помехи.

Основным методическим приемом, используемым при обработке цифровых записей слабых сейсмических сигналов из ближней (до 10 км) зоны, является поляризационный анализ, для проведения которого наряду с упомянутым выше программным кодом *ELWIN* применяется программный код *WSG* [Красилов и др., 2006], разработанный в ГС РАН для трехкомпонентных станций.

*Акустические сигналы* (кажущаяся скорость до 350 м/с) составляют до 80% событий с импульсной волновой формой. В соответствии с гистограммами распределения событий по времени суток, их основная часть отмечается, как правило, в рабочее время, однако, регистрируются они и в ночные часы. Поляризационный анализ показал, что весь сигнал представляет собой поверхностную волну. При “подозрении” на принадлежность сигнала к акустическим дополнительно анализируются записи акустических датчиков, расположенных на территории геофизической обсерватории “Михнево” вблизи датчика 2.3 (см. рис. 1).

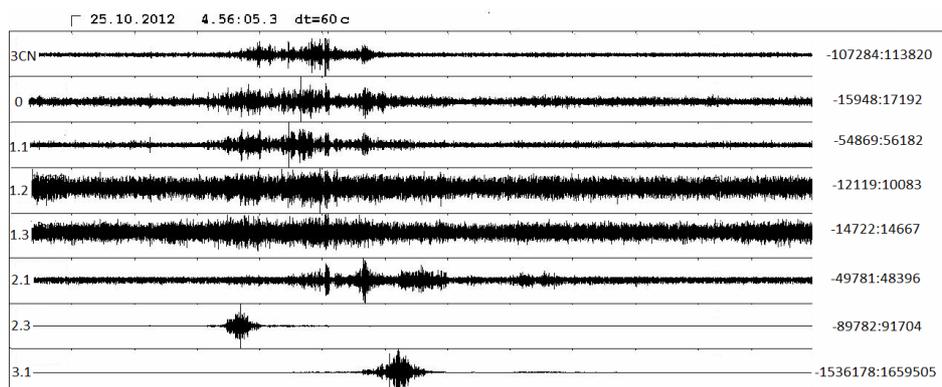
<sup>1</sup> *ELWIN* – основная программа, используемая при обработке данных на МСА “Михнево”.

При наличии синхронных сигналов на акустических и сейсмических датчиках они уверенно идентифицируются как “акустика” (рис. 2). Приведенная волновая картина является типичной для акустических сигналов от техногенных источников.



**Рис. 2.** Характерная форма записи акустических сигналов, зарегистрированных на МСА “Михнево”. Вертикальной чертой на каждой записи выделено вступление сигнала. Слева на трассах – номера датчиков; справа – вертикальная развертка для каждого канала в отсчетах (1 отсчет равен  $7.45 \cdot 10^{-6}$  мкм/с)

*Сигналы, связанные с движением автотранспорта.* Из оставшихся после отбраковки акустических сигналов прежде всего необходимо исключить техногенные, связанные с движением автотранспорта и работающими агрегатами. В течение нескольких месяцев 2012 г. велся журнал, в котором отмечался весь автотранспорт, проезжающий по территории ГФО “Михнево”. Эти данные в дальнейшем использовались для корректного выделения техногенных сигналов, зарегистрированных сейсмической группой. На ближайших к дороге датчиках 2.3 и 3.1 максимальные амплитуды сигналов достигают 8940 нм/с. На датчиках 1.2 и 1.3, удаленных от дороги, амплитуды уменьшаются до ста раз. Характерным признаком сигналов, вызванных движением автотранспорта, являются временные задержки их появления на определенных датчиках группы – 2.3, 3.1 (рис. 3), расположенных непосредственно вблизи дороги.



**Рис. 3.** Характерная форма записи возбуждаемого проезжающей автомашиной сигнала, позволяющая определить направление движения [Кишкина и др., 2010]. Обозначения см. на рис. 2

Следует особо отметить, что такая простота идентификации сигналов, связанных с проезжающим автотранспортом, возможна только при наличии сейсмической антенны. Использование записи сигнала на одной станции не позволяет определить направление движения. Вид сейсмограммы зависит от типа и нагруженности транспорта (лег-

ковая или грузовая автомашина, трактор). Наличие на дороге неровностей и ям приводит к появлению записей, аналогичных записям локальных сейсмических событий, на которых выделяются  $P$ - и  $S$ -волны, в связи с чем при использовании известных методик возможно ошибочное отнесение техногенных событий к тектоническим.

Сигналы от работающих агрегатов характеризуются пакетами длительностью около 10 с, достаточно четкими первыми вступлениями и резким уменьшением амплитуд при прекращении работы устройства. На рис. 4 приведен пример записи сигнала от расположенного на земной поверхности агрегата, работающего при прокладке линии электропередач (ЛЭП). Можно видеть, что амплитуды техногенных сигналов превышают амплитуды шума в 3–5 раз.

Техногенные сигналы от расположенных на поверхности источников отличаются небольшой кажущейся скоростью (до 350 м/с). Сложность их распознавания на территории ГФО “Михнево” состоит в том, что скорость распространения сейсмических волн в верхней части разреза (до глубины 10 м), сложенной преимущественно суглинком, приблизительно равна скорости акустических волн, что может привести к ошибке в определении природы источника, если не использовать при анализе характерные формы записи.

Одним из путей уменьшения неоднозначности при идентификации событий является исследование частотного состава сигналов от различных источников. Для сравнительного анализа были отобраны сигналы от проезжающей автомашины, трактора, работающего агрегата, а также зарегистрированные при бурении скважины на территории ГФО “Михнево” в марте 2013 г. до глубины 46 м.

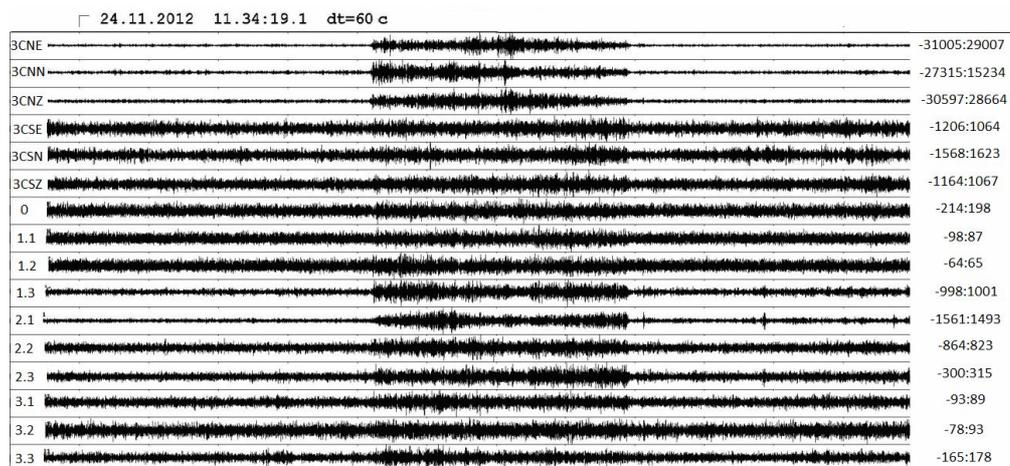
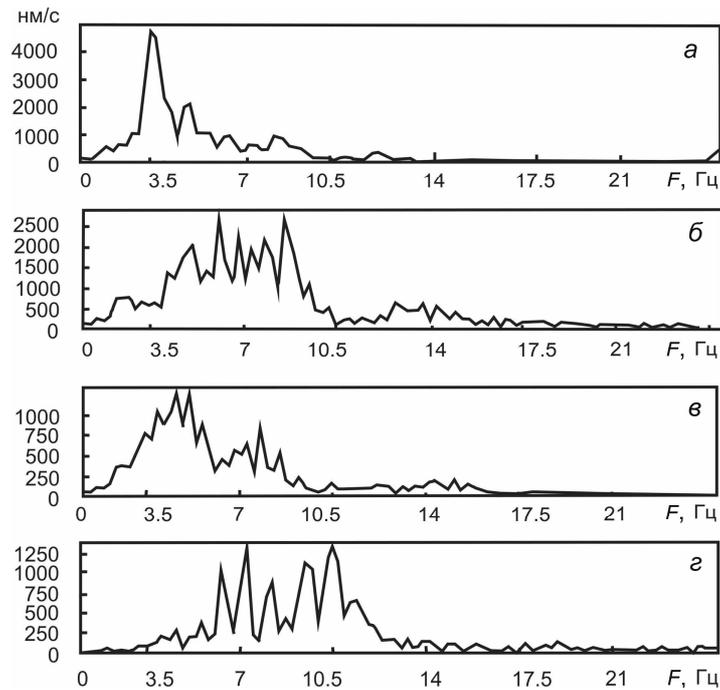


Рис. 4. Характерная форма записи сигналов, возбуждаемых работающим на поверхности агрегатом при прокладке ЛЭП. Обозначения см. на рис. 2

Местность, на которой расположена МСА “Михнево”, характеризуется перепадом высот до 15 м и мощным осадочным слоем. В таких условиях спектральный состав высокочастотных сигналов может зависеть от точки установки конкретного прибора. Однако длительный (в течение девяти лет) опыт эксплуатации МСА “Михнево” показал, что применение специальных методов обработки даже в этих условиях позволяет уверенно выделять сейсмические сигналы, используя основное преимущество группы – процедуру суммирования сигнала для повышения отношения сигнал/шум [Санина и др., 2009]. В данной работе для исключения неоднозначности интерпретации исследовался спектральный состав сигналов, зарегистрированных центральным прибором 0, расположенным на глубине 20 м в штольне, пройденной в известняке; спектры сигналов приведены на рис. 5.



**Рис. 5.** Типичные спектры сигналов импульсной волновой формы, возбуждаемых разными источниками: *а* – акустический сигнал; *б* – трактор; *в* – легковой автомобиль; *г* – работающий наземный агрегат

Временной интервал для расчета спектра выбирался с учетом длительности сигнала и его природы. Для акустических сигналов он составлял 1 с; для сигналов, связанных с перемещением автотранспорта и работой наземных агрегатов, – 10 с. При сопоставлении спектрального состава сигналов от источников разного типа хорошо видно различие их частоты и интенсивности. Наиболее мощной является спектральная амплитуда для акустического сигнала на частоте 3.5 Гц (рис. 5, *а*). Спектр для автотранспорта имеет более широкий диапазон изменения частот от 4 до 10 Гц. Интересным является присутствие минимума на частоте 6 Гц для автомобиля (рис. 5, *в*) и относительно малые вариации амплитуд для спектра, соответствующего движению трактора (рис. 5, *б*). В спектральном составе сигнала от работающего агрегата отсутствуют частоты ниже 6 Гц (рис. 5, *г*).

Таким образом, каждый из рассмотренных техногенных сигналов имеет свой спектральный состав, по которому может быть идентифицирован его источник. При этом в спектрах всех сигналов (кроме более низкочастотного акустического) фиксируются частоты до 11 Гц.

*Сигналы, регистрируемые в процессе бурения скважины.* Рассмотрена группа сигналов, зарегистрированных при бурении скважины, расположенной на территории ГФО «Михнево» на расстоянии 210 м от центрального датчика 0 (см. рис. 1); примеры записей – рис. 6.

Были проанализированы амплитудные спектры сигналов для разных интервалов бурения (рис. 7). Спектр в интервале глубин 0–10 м характеризуется максимумом на частотах 5 Гц и 8 Гц на фоне общего усиления сейсмического сигнала в диапазоне частот до 17.5 Гц (рис. 7, *а*). При бурении в интервале 10–20 м, пройденном в толще неравномерно трещиноватых известняков с подчиненными прослоями глины и мергеля, происходит смещение амплитудного спектра в область более высоких частот (рис. 7, *б*). Максимум амплитуд на частоте 5 Гц практически исчезает, наряду с максимумом амплитуды на частоте 8 Гц появляются максимумы на частотах 14–15 Гц. С увеличением глубины до 27 м отмечается общий тренд смещения амплитудного спектра к диапазону частот

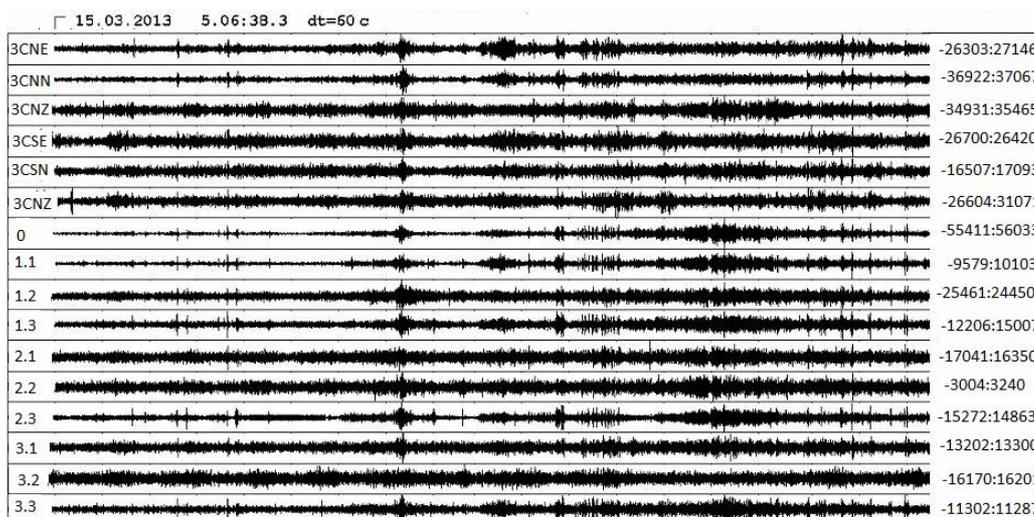


Рис. 6. Характерная форма записи при бурении скважины в интервале глубин 27.4–30.9 м

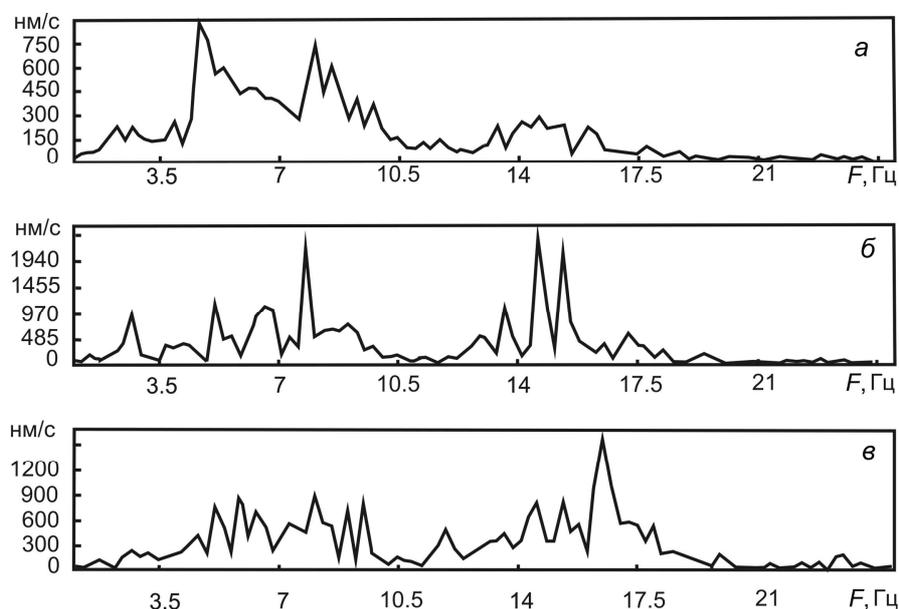


Рис. 7. Изменение с глубиной  $h$  спектральных амплитуд сигналов, зарегистрированных при бурении скважины:  $a$  –  $h=1.0$  м;  $б$  –  $h=17.0$  м;  $в$  –  $h=22.6$  м

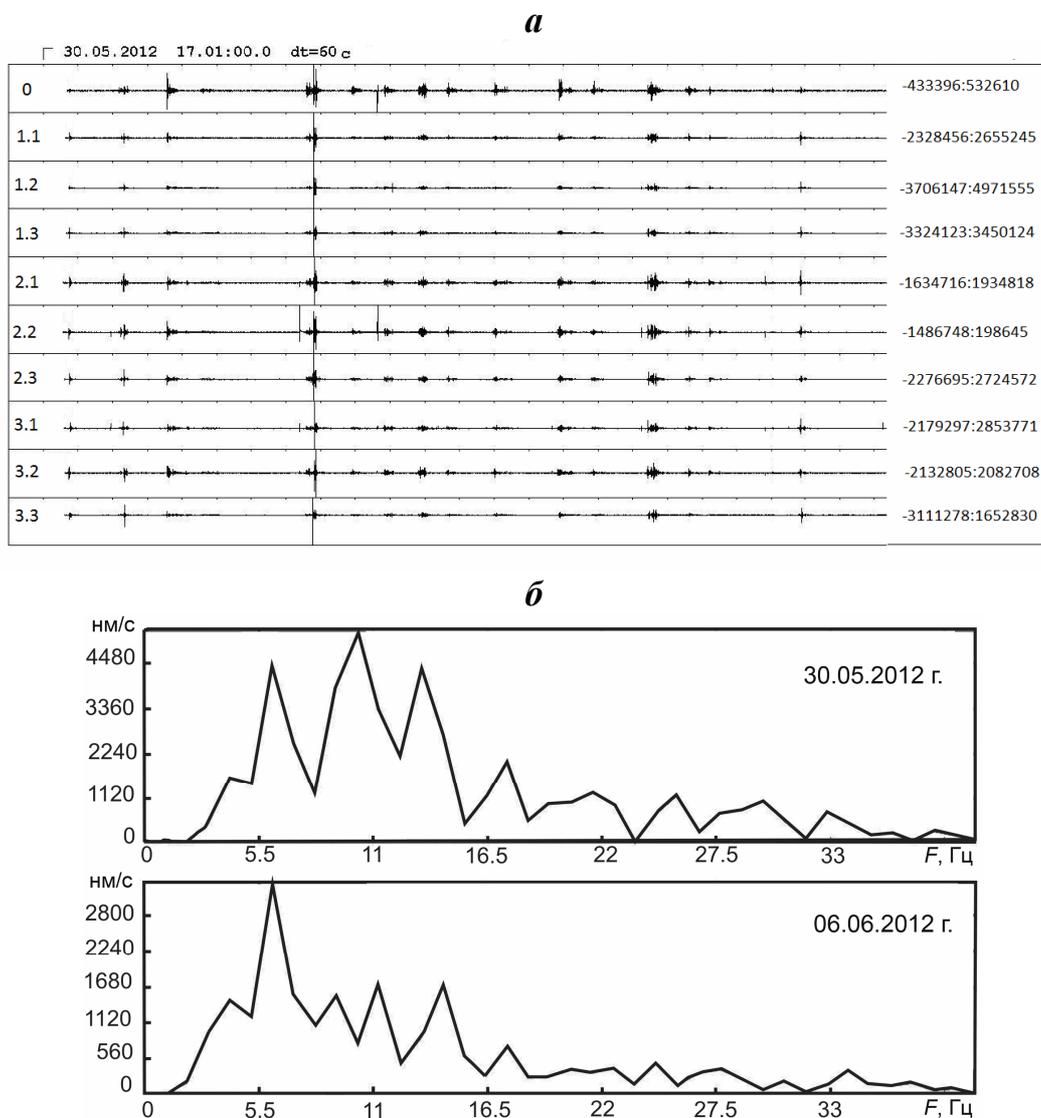
до 16–17 Гц при сохранении относительных максимумов на частотах 5–8 Гц (рис. 7, в). Появление максимума на частотах 16–17.5 Гц, вероятно, обусловлено присутствием в интервале глубин 20–27 м сильно трещиноватых, неравномерно окремненных известняков.

При прохождении верхнего слоя, представленного в интервале глубин 0–10 м суглинками, фиксируются кажущиеся скорости, не превышающие 350 м/с и возрастающие с глубиной до 900–2000 м/с. Зарегистрированное смещение амплитудного спектра в область высоких частот связано с изменением литолого-стратиграфического разреза с глубиной [Горбунова, 2007].

Полученные амплитудные спектры сигналов, зарегистрированных при положении техногенного источника на разных глубинах, могут быть использованы как опорные при решении обратной геофизической задачи, а именно при определении особенностей геологического строения участка исследований и оценки глубины источника сейсмических колебаний.

**Грозовые источники.** Сигналы от проходящего грозового фронта, характеризующиеся кажущейся скоростью до 350 м/с и регистрируемые в виде серии импульсов, были выделены в отдельную группу и рассматривались при регистрации сейсмических событий как помехи. Такие сигналы отмечаются в летние месяцы (май–август) (рис. 8, а), и по их записям можно проследить прохождение грозового фронта в окрестности территории ГФО “Михнево”. Наши данные о прохождении грозового фронта подтверждаются наблюдениями на метеостанции и акустической группе, расположенных на территории ГФО “Михнево” [Санина и др., 2008].

В частотном составе сигналов, зарегистрированных во время гроз 30.05. и 06.06. 2012 г., отмечается увеличение амплитуд на частотах от 5 до 16.5 Гц (рис. 8, б). Многолетние наблюдения позволили установить, что характерной особенностью спектра сигналов, регистрируемых при прохождении грозовых фронтов, является устойчивый максимум на частоте 6 Гц. Последующие максимумы могут смещаться по частоте и меняться по амплитуде, что по всей видимости связано с расстоянием от грозового удара до МСА “Михнево”.



**Рис. 8.** Характерная запись сигналов от проходящего грозового фронта 30.05.2012 г. (а) и спектральные амплитуды сигналов, зарегистрированных во время прохождения грозовых фронтов 30.05 и 06.06. 2012 г. (б). На а обозначения те же, что на рис. 2

Для оценки энергетического вклада техногенных событий в формирование общего микросейсмического фона в пределах ГФО “Михнево” проведена оценка интенсивности выше рассмотренных сигналов по методике, адаптированной к условиям регистрации сейсмических событий на МСА “Михнево” [Санина и др., 2009]. Было установлено, что наиболее интенсивными являются сигналы от акустических источников (магнитуда  $m_b = -0.06$ ). Работе агрегатов соответствует магнитуда  $m_b = -0.7$ ; бурению скважины в интервале глубин 0–10 м –  $m_b = -1.3$ ; движению легкового автомобиля –  $m_b = -1.7$ . Однако, несмотря на достаточно низкие значения магнитуд, эти сигналы по своей амплитуде зачастую превышают амплитуды природных, а по спектральному составу близки к полосе регистрации локальных землетрясений.

### Выводы

Накопленный опыт регистрации событий на МСА “Михнево” позволил создать оригинальный банк волновых форм и спектральных характеристик нетектонических событий, связываемых с определенными источниками сигналов.

При рассмотрении спектров от движущегося автотранспорта и работающих на поверхности агрегатов во всех спектрах фиксируются частоты до 11 Гц. Наличие в спектре частот более 15 Гц может быть обусловлено сигналами от источников, расположенных на глубине более 10 м. Имеющиеся сведения о геологическом строении участка могут быть использованы для оценки не только глубины источника, но и типа (природы) самого сигнала.

Грозовые импульсы, представляющие отдельную группу сигналов, имеют сложный спектральный состав и низкую кажущуюся скорость.

На территории Восточно-Европейской платформы, изучению сейсмического режима которой уделяется все большее внимание, практически не осталось мест, где можно было бы вести сейсмологические наблюдения без техногенных помех. Опыт эксплуатации МСА “Михнево” продемонстрировал высокую эффективность малоапертурных групп при сейсмическом мониторинге слабых событий в условиях урбанизации территории.

Наш опыт показывает, что обработку сейсмограмм следует вести в два этапа: на первом сейсмограммы очищаются от техногенного шума; на втором осуществляется поиск полезных сигналов. Разработка соответствующей методики и алгоритмов обработки ведется в настоящее время в ИДГ РАН.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 11-05-00871-а и № 12-05-00956-а).

### Литература

- Асминг В.Э. Создание программного комплекса для автоматизации детектирования, локации и интерпретации сейсмических событий и его использование для изучения сейсмичности Северо-Западного региона: Дис. . . . канд. физ.-мат. наук. М.: ИДГ РАН, 2004. 128 с.
- Годзиковская А.А., Бесстраинов В.М., Лабзина Е.Ю. Землетрясения и взрывы Восточно-Европейской платформы // Природные опасности России; сейсмические опасности. М.: Изд-во “Крук”, 2000. С.46–53.
- Годзиковская А.А. Дальность макросейсмических проявлений при взрывах // Всероссийская конференция с международным участием “Проблемы сеймотектоники”. М.: ИФЗ РАН, 2011. С.179–183.

- Горбунова Э.М. Характеристика инженерно-геологического разреза территории геофизической обсерватории “Михнево” по результатам бурения экспериментальной скважины // Физические поля и динамика взаимодействующих геосфер: Сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2007. С.289–297.
- Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы / Под ред. Н.В. Шарова, А.А. Маловичко, Ю.К. Шукина. Кн. 1: Землетрясения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 381 с.
- Кишкина С.Б., Кочарян Г.Г., Локтев Д.Н., Санина И.А., Волосов С.Г., Константиновская Н.Л., Нестеркина М.А., Черных О.А. Результаты регистрации сейсмических событий малоапертурной сейсмической группой в районе расположения Ленинградской АЭС-2 // Сборник трудов XVI Международной конференции “Свойства структура, динамика и минерагения литосферы Восточно-Европейской платформы”. Воронеж, 2010. С.335–338.
- Красилов С.А., Коломиец М.В., Акимов А.П. Организация процесса обработки цифровых сейсмических данных с использованием программного комплекса WSG // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы Международной сейсмологической школы, посвященной 100-летию открытия сейсмических станций “Пулково” и “Екатеринбург”. Петергоф, 2–6 октября 2006 г. Обнинск, 2006. С.77–83.
- Маловичко А.А., Габсатарова И.П., Пойгина С.Г., Чепкунас Л.С. Современная сейсмичность Восточно-Европейской платформы // Сейсмологические наблюдения на территории Москвы и Московской области. Материалы научной конференции. Обнинск: ГС РАН, 2012. С.62–69.
- Санина И.А., Волосов С.Г., Черных О.А., Ризниченко О.Ю. Малоапертурная сейсмическая антенна “Михнево”: новые возможности изучения сейсмичности Восточно-Европейской платформы // Докл. РАН. 2009. Т. 428, № 4. С.536–541.
- Санина И.А., Нестеркина М.А., Константиновская Н.Л., Данилова Т.В., Волосов С.Г. Электронный банк данных сейсмических событий центральной части Восточно-Европейской платформы по данным геофизической обсерватории ИДГ РАН “Михнево”. Рег. “Роспатент” № 2013620005. 2012.
- Санина И.А., Рыбнов Ю.С., Солдатенков А.М., Харламов В.А. Сейсмоакустические эффекты при грозовой активности // Геофизика межгеосферных взаимодействий: Сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2008. С.67–78.

#### Сведения об авторах

**САНИНА Ирина Альфатовна** – доктор физико-математических наук, заведующая лабораторией сейсмологических методов исследования литосферы, Институт динамики геосфер РАН. 119334, г. Москва, Ленинский пр., д. 38, корп. 1. Тел.: 8(495)939-75-82. E-mail: irina@idg.chph.ras.ru

**НЕСТЕРКИНА Маргарита Алексеевна** – научный сотрудник, Институт динамики геосфер РАН. 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 38, корп. 1. Тел.: 8(495)939-75-82. E-mail: nesrita@yandex.ru

**КОНСТАНТИНОВСКАЯ Наталия Львовна** – младший научный сотрудник, Институт динамики геосфер РАН. 119334, г. Москва, Ленинский пр., д. 38, корп. 1. Тел.: 8(495)939-75-82. E-mail: konstnat@list.ru

**ГОРБУНОВА Элла Михайловна** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт динамики геосфер РАН. 119334, г. Москва, Ленинский пр., д. 38, корп. 1. Тел.: 8(495) 939-75-19. E-mail: emgorbunova@bk.ru

## IDENTIFICATION OF NONTECTONIC SIGNALS FROM NEAR SOURCES BY “MIKHNEVO” SMALL APERTURE SEISMIC ARRAY

I.A. Sanina, M.A. Nesterkina, N.L. Konstantinovskaya, E.M. Gorbunova

*Institute of Geospheres Dynamics RAS, Moscow, Russia*

**Abstract.** Among the variety of weak seismic signals, impulses of various origin with duration from 1–2 to 8–10 seconds are of special interest. As a rule, the majority of studies are devoted to analysis of the natural signals, caused by activity of separate crustal blocks. At the same time a number of technogenic signals are frequently mistakenly treated as natural ones due to similarity of such parameters as their duration, frequency content, etc.

This paper presents the results of extraction of technogenic impulses from the sources located on the surface (moving cars, working units, etc.) and at depths in a borehole up to 46 m from all other impulses recorded at “Mikhnevo” small aperture seismic array (SASA “Mikhnevo”).

The signals of external (exogenous) origin caused by passing thunder storm fronts which can be wrongly referred to signals of tectonic origin are analyzed separately.

**Keywords:** small aperture seismic array, impulse signal, technogenic noise, frequency content.