



А. С. Беляков
Д. М. Губерман
А. Д. Жигалин
В. С. Лавров
А. А. Любушин
В. А. Мухамедов
А. В. Николаев
А. В. Севальнев
Ю. Н. Яковлев

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ РАН, МОСКВА
ФГУДП НПЦ "КОЛЬСКАЯ СВЕРХГЛУБОКАЯ", пос. ЗАПОЛЯРНЫЙ
ИНСТИТУТ ГЕОЭКОЛОГИИ РАН, МОСКВА
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ РАН, МОСКВА
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ РАН, МОСКВА
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ РАН, МОСКВА
ИФЗ РАН, ИНСТИТУТ ГЕОЭКОЛОГИИ РАН, МОСКВА
ИНСТИТУТ ГЕОЭКОЛОГИИ РАН, МОСКВА
ФГУДП НПЦ "КОЛЬСКАЯ СВЕРХГЛУБОКАЯ", пос. ЗАПОЛЯРНЫЙ

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ В КОЛЬСКОЙ СВЕРХГЛУБОКОЙ СКВАЖИНЕ

АННОТАЦИЯ. При проведении геоакустического мониторинга в Кольской сверхглубокой скважине на глубине 3050 м удалось зарегистрировать слабые высокочастотные акустические шумы и их вариации, которые ранее не устанавливались. Зарегистрировано антропогенное влияние на микросейсмический фон (полоса частот 0,3 - 10 Гц). После обработки данных измерений с использованием оригинальной методики выделены пять сейсмических событий, удаленных от пункта наблюдения на значительные расстояния.

Земля в качестве объекта всестороннего исследования доступна для прямого наблюдения только с поверхности. О составе и строении земных недр, а также о происходящих в них процессах можно судить лишь по косвенным, чаще всего геофизическим, данным. Поэтому вполне объяснимо стремление геологов проникнуть как можно дальше в глубь Земли с помощью бурения. Так возникла идея проведения сверхглубокого бурения.

Буровые скважины, как правило, проходятся для поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, извлечения из недр воды, углеводородов, серы, для инженерных изысканий и решения ряда других прикладных задач. Однако в последние десятилетия бурение глубоких скважин все шире используется как метод решения фундаментальных научных проблем современной геологии и тектоники. Результаты научного бурения во многом оказались неожиданными для геологов и геофизиков и заставили пересмотреть некоторые теоретические представления, правильность которых до этого не вызывала сомнения. Скважины научного бурения на континентах имеют глубины 3 - 7 км (глубокие скважины) и более 7 км (сверхглубокие скважины). Однако такие скважины бурятся редко. Чаще проходка глубоких и сверхглубоких скважин ведётся с целью разведки и поисков, а также эксплуатации месторождений углеводородного сырья. Эти скважины проходятся, как правило,

без отбора керна и поэтому не могут в полной мере использоваться для научных целей. Что касается использования глубоких и сверхглубоких скважин для сейсмологических целей, то такая задача находится пока в постановочной стадии, хотя необходимость в таких исследованиях существует.

После того, как бурение сверхглубоких скважин заканчивается, они преобразуются в постоянно действующие лаборатории. Специалисты, работающие в таких лабораториях, следят за изменением режима земных недр вдоль ствола скважины и в окоскважинном пространстве, проводят различные эксперименты. Такие лаборатории созданы на базе Кольской и Воротиловской скважин в России и скважины КТБ-Оберпфальц в Германии.

В настоящее время глубокие и сверхглубокие скважины мало используются для проведения геофизического мониторинга с целью изучения процессов, происходящих в земной коре и связанных с подготовкой сильных и катастрофических землетрясений. Вместе с тем на базе глубоких и сверхглубоких скважин может (и должна) быть создана сеть глобального мониторинга с целью выявления предвестников землетрясений на основе регистрации и анализа вариаций физических полей, предшествующих и сопутствующих сейсмическим событиям. Предположительно сверхглубокое буре-

ние можно использовать и для изучения строения очагов землетрясений и происходящих в них процессов с прогнозными целями.

Наблюдения, проводимые в скважинах, имеют ряд существенных преимуществ перед наземными измерениями, благодаря чему можно существенно расширить возможности геофизического мониторинга процессов подготовки сильных землетрясений. Скважинные геофизические наблюдения осуществляются в обстановке существенно меньшего воздействия геофизических шумов, связанных с влиянием земной поверхности - сейсмических, акустических, деформационных, электрических, магнитных и гравитационных. Измерения в таких условиях позволяют выявить тонкие вариации геофизических полей, связанные как с локальными, так и с глобальными геодинамическими процессами. Сопоставление результатов наблюдений на сети геофизических обсерваторий, оборудованных в скважинах, с проводимыми на поверхности и в горных выработках наблюдениями за естественными и техногенными воздействиями на земную кору позволяет идентифицировать влияние отдельных факторов и осуществлять мониторинг состояния земной коры, выявлять предвестниковые эффекты, указывающие на подготовку катастрофических явлений (сильные землетрясения, быстрые подвижки в земной коре, обширные экзогенные геологические процессы типа оползней, обвалов и др.), а также количественно оценивать интенсивность (магнитуду) произошедших катастроф - взрывов, землетрясений, прорывов больших плотин, крупных и гигантских оползней и обвалов.

Современные представления о процессах, происходящих при подготовке очагов землетрясений и сопровождающих само землетрясение, в значительной части основаны на теории разрушения. Согласно этой теории, долговременная прочность материалов на разрушение существенно меньше, чем кратковременная. При этом разрушению предшествует ускоренный рост трещиноватости, сопровождающийся сейсмоакустической эмиссией. В ходе разрушения горных пород происходит объединение групп и кластеров трещин в более крупные трещинные образования, вследствие чего наблюдаются усиление интенсивности сейсмоакустической эмиссии и понижение частоты звуковых колебаний. Из этого следует, что пространственная структура шумовых флуктуаций должна подчиняться требованию синхронности проявления флуктуаций уровня шума в сравнительно больших объемах, которые увеличиваются вблизи источника. Наблюдаются также флуктуации интенсивности эмиссии за несколько десятков минут или часов до момента возникновения землетрясения.

Таким образом, возникновение сейсмоакустической (сейсмической и акустической) эмиссии является надёжным предвестниковым эффектом; однако необходимо, чтобы этот эффект не был зашумлен микросейсмическими и акустическими сигналами техногенного или другого поверхностного происхождения, т. е. экзогенными помехами.

Поскольку дистанции затухания сейсмических волн существенно зависят от их частоты, на больших рассто-

яниях от очагов преобладают микросейсмические колебания с частотами от долей герца до сотен герц. Наблюдаемые предвестниковые вариации акустической эмиссии связаны с двумя типами эффектов. Первый из них представляет собой нелинейное преобразование сейсмического сигнала в ходе его пространственно-временной эволюции, переходом энергии в область высоких частот. Второй эффект связан с возникновением акустической эмиссии вследствие гедеформационного процесса, обусловленного перестройкой поля напряжений в районе пункта наблюдений. Этот процесс сопровождается также приливные изменения силы тяжести, воздействия на земную кору интенсивных штормовых микросейсм (характерные периоды 4 - 8 с), т. е. связан с действием локальных инициирующих факторов. Последние могут быть связаны как с глобальными, так и с региональными и локальными гедеформационными процессами, сопровождающими заключительную фазу подготовки очагов катастрофических, сильных или умеренно сильных землетрясений с магнитудами 8 и больше, 6 и больше, 5 и больше, соответственно.

Двухуровневый сейсмоакустический мониторинг на Кольской сверхглубокой скважине СГ-3 проводился в 2005 - 2006 гг. с целью обнаружения сигналов (аномалий поведения), которые можно было бы рассматривать в качестве признаков-предвестников сильных землетрясений. Поскольку территория Кольского полуострова характеризуется умеренной сейсмичностью (сотрясаемость до 6 - 7 баллов по шкале MSK-64), то речь может идти о достаточно сильных удалённых землетрясениях [1].

Геофизические наблюдения в Кольской сверхглубокой скважине были возобновлены после длительного перерыва. Геоакустические и иные геофизические исследования, которые проводились в Кольской сверхглубокой скважине ранее, были в основном эпизодическими и кратковременными. Что касается измерений уровня сейсмоакустической эмиссии, то для регистрации слабых высокочастотных акустических колебаний чувствительность используемой аппаратуры была явно недостаточной. При проведении мониторинга были применены более совершенные измерительные приборы - магнитоупругие геофоны с высокой чувствительностью и использована новая методика непрерывных наблюдений [3, 4]. Один из геофонов был установлен в скважине на глубине 3050 м, а второй - на поверхности вблизи скважины. Регистрограмма вариаций интенсивности акустического шума за период наблюдений с 19 октября 2005 г. по 21 февраля 2006 г. приведена на рис. 1, на котором сверху вниз расположены графики для восьми частотных каналов, обозначенных следующим образом: каналы M_1 и M_5 для полос 30 Гц в скважине и на поверхности, соответственно; M_2 и M_6 - для полос 160 Гц; M_3 и M_7 - для полос 500 Гц; M_4 и M_8 - для полос 1000 Гц. Нижний график M_9 относится к сейсмическому каналу с частотной полосой 0,3 - 10 Гц в скважине. Средние амплитуды смещений для частотных полос в скважине СГ-3 мало отличаются от соответствующих амплитуд, измеренных на глубине 900 м в Припятском прогибе, что свидетельствует о сходстве наблюдаемых процессов [2].

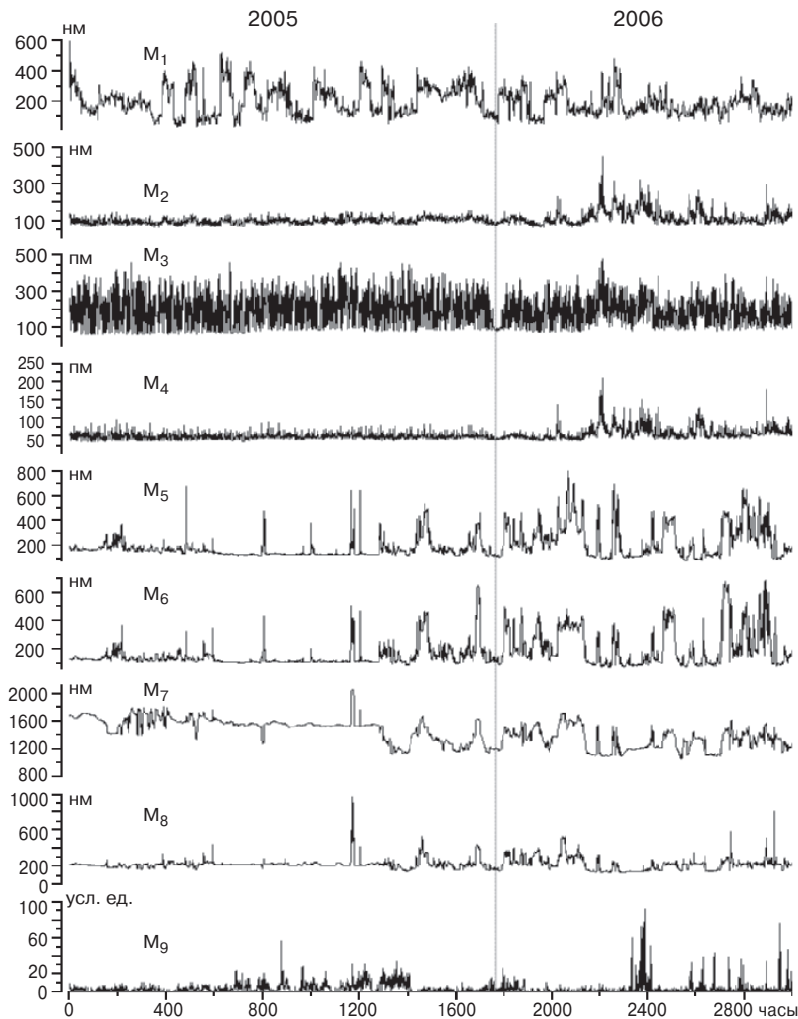
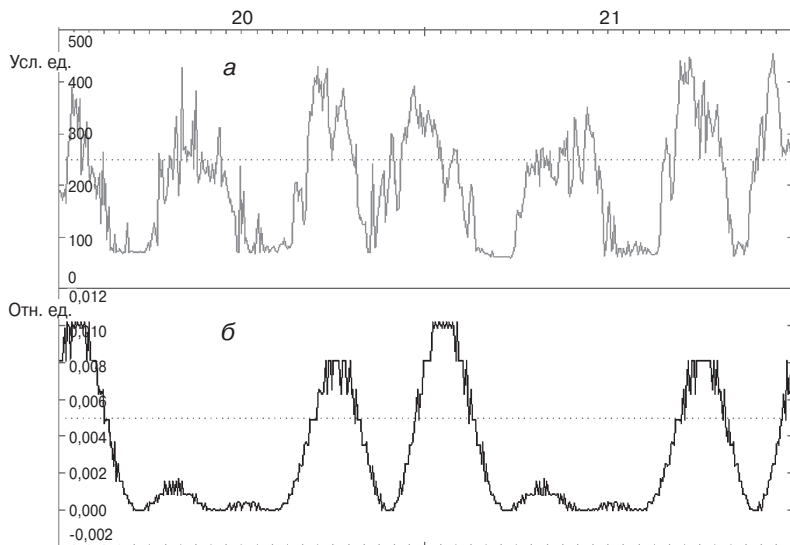


Рис. 1. Результаты многодневного сейсмоакустического мониторинга на Кольской сверхглубокой скважине СГ-3: интервал наблюдений - с 08:00 19.10.2005 г. по 07:00 21.02.2006 г.; измерения выполнялись в стволе на глубине 3050 м и на поверхности; $M_1 - M_9$ - индексы сигналов (каналов), описанных в тексте



При рассмотрении графиков было установлено, что в выходные дни интенсивность акустического шума в сейсмическом диапазоне с полосой частот 0,3 - 10 Гц заметно ниже, чем в рабочие дни. Это регулярно наблюдалось во все выходные дни на протяжении всего времени проведения измерений. В полосе 500 Гц на глубине 3050 м был отмечен аномально высокий (по сравнению с другими частотными полосами) уровень шума, ночные вариации которого очень хорошо синхронизированы с ночными вариациями мощности солнечной компоненты приливной деформации. Сопоставление вариаций шума с вариациями мощности солнечной приливной составляющей приведено на рис. 2. Регулярное дневное повышение уровня акустического шума, не синхронизированное с приливной деформацией, проявляющееся в виде вариаций с периодом 8 ч (480 мин), оказалось связанным с трёхсменным режимом работы местного горно-металлургического комбината. Необходимо также отметить, что в частотной полосе 500 Гц в скважине и на поверхности наблюдаются аномально высокие амплитуды смещений с сильно выраженным низкочастотным трендом, на фоне которого суточные вариации визуально не обнаруживаются.

На фоне наблюдаемых в скважине и на поверхности вариаций акустического шума хорошо заметны регулярные ежедневные выбросы, которые регистрировались, как правило, около 6 ч и 15 ч по местному времени (в 3 ч и 12 ч до 30 октября и в 4 ч и 13 ч после 30 октября по Гринвичу). В указанные моменты времени ежедневно в течение получаса происходило от трёх до восьми выбросов, которые очень похожи на взрывы под землей и в карьерах. Регистрограмма дневных взрывов приведена на рис. 3. В среднем взрывные процессы характеризуются повышением уровня шума в 10 раз и более по сравнению с его фоновым значением. По данным измерений на поверхности повышение уровня шума в среднем оказалось меньше в четыре раза.

До проведения мониторинга было невозможно предположить, что на глубине 3050 м могут быть так хорошо заметны антропогенные

Рис. 2. Вариации подземного шума в полосе 500 Гц (а) в сопоставлении с расчётным графиком изменения мощности относительной деформации под воздействием солнечной гравитации (б): запись в интервале времени с 00:00 22.10.2005 г. по 00:00 22.10.2005 г.

и техногенные шумы. Однако оказалось, что влияние и тех и других настолько велико, что они почти полностью маскируют естественные высокочастотные геоакустические шумы, обусловленные протекающими эндогенными процессами. Обнаружить и корректно подтвердить наличие такого рода сигналов стало возможным только в результате длительного и непрерывного мониторинга, во время которого было установлено, что с местным декретным временем регулярно синхронизируется не только время взрывов, но и время перерывов между суточными максимумами акустического шума. Так, было установлено, что антропогенный шум города в скважине обнаруживается на частотах 0,3 - 10 Гц регулярным и существенным снижением уровня в субботние и воскресные дни. Техногенный шум, как уже упоминалось, синхронизируется с технологическим регламентом горно-металлургического комбината, тяжёлое оборудование которого работает в три смены по 8 ч без выходных дней. Трёхсменный производственный ритм (по данным мониторинга) был нарушен только один раз перед началом 2006 г., когда в течение нескольких часов наблюдались типичный эндогенный шум и сопутствующие ему акты сейсмоакустической эмиссии. Полученный неожиданный результат, показавший, что относительно слабые антропогенные и техногенные воздействия регулярно регистрируются на глубине 3050 м и на значительном удалении (около 6 км) от их источника, говорит о необходимости проведения детальных специальных исследований распределения акустического шума по глубине скважины в суточном ритме. Возможно, что полученный результат связан с положением наблюдательной точки вблизи нижней части разреза ждановской свиты (2250 - 2800 м), к которой приурочена главная тектоническая зона Печенгского рудного поля.

Одна из рабочих гипотез о существовании сейсмоакустических предвестников удаленных землетрясений основана на обнаруженных эффектах синхронизации поля микросейсмических колебаний на больших территориях. Физические механизмы феноменов синхронизации в настоящее время неясны. Более того, сами факты выделения таких феноменов пока еще немногочисленны, что связано с катастрофической нехваткой данных для подробного выделения аномалий по данным мониторинга. Однако выделенные аномалии синхронизации являются статистически значимыми и могут быть основой для систематического поиска предвестников сильных землетрясений при наличии непрерывно работающей системы мониторинга фоновых процессов в земной коре в пределах больших регионов. Поэтому данные, полученные при проведении длительного мониторинга в Кольской сверхглубокой скважине СГ-3, обрабатывались с применением специальной методики. Эта методика основана на выделении коллективных вариаций в многомерном временном ряду с определением спектральной и робастной вейвлетной меры когерентного поведения, оцениваемых в скользящем временном окне [5, 6, 7].

Спектральная мера когерентного поведения основана на использовании канонических когерентностей, которые являются обобщением понятия спектра когерентности при ситуации, когда вместо пары скалярных временных рядов необходимо исследовать связь между двумя векторными временными рядами на различных частотах. Эта мера представляет собой произведение абсолютных значений так называемых канонических когерентностей каждого из сигналов и прочих компонент многомерного временного ряда. Иными словами, каждая из канонических когерентностей описывает силу

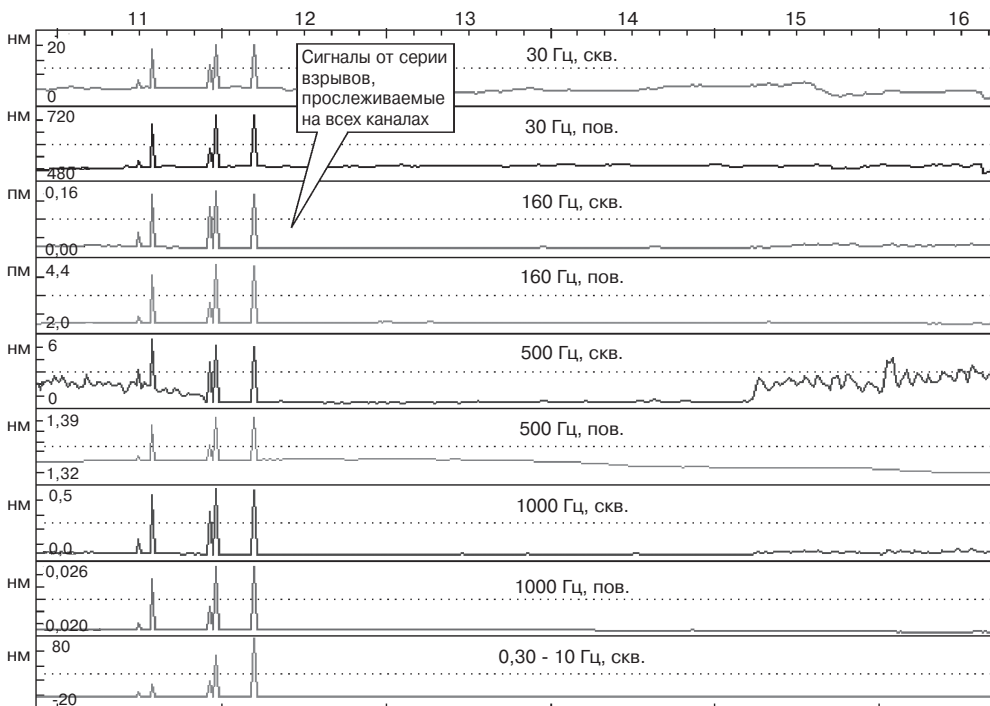


Рис. 3. Регистрограммы, демонстрирующие записи сигналов серии удалённых промышленных взрывов: запись в интервале времени с 10:52 по 16:30 23.10.2005 г.

связи своей компоненты с прочими составляющими многомерного сигнала на заданной частоте. Произведение таких когерентностей даёт совокупную меру коллективного поведения для текущего временного окна и для заданной частоты.

Спектральная мера когерентности является инструментом для обнаружения эффектов синхронизации, основанных на появлении общих составляющих, имеющих вид гармонических колебаний. Однако возможно также появление общих составляющих, имеющих вид сильно нестационарных всплесков. В этом случае спектральный подход является неадекватным природе общих сигналов, появление которых необходимо обнаружить. Альтернативным подходом, наилучшим образом ориентированным на выделение сильно нестационарных сигналов, является использование другой системы базисных функций - системы финитных ортогональных функций-вейвлетов.

Для выделения коллективных эффектов в многомерном временном ряду, имеющих резко нестационарный характер, была предложена робастная вейвлетная мера когерентности. Статистический термин "робастный" происходит от английского слова *robust* - дюжий, грубый, нечувствительный. Робастный метод - это метод анали-

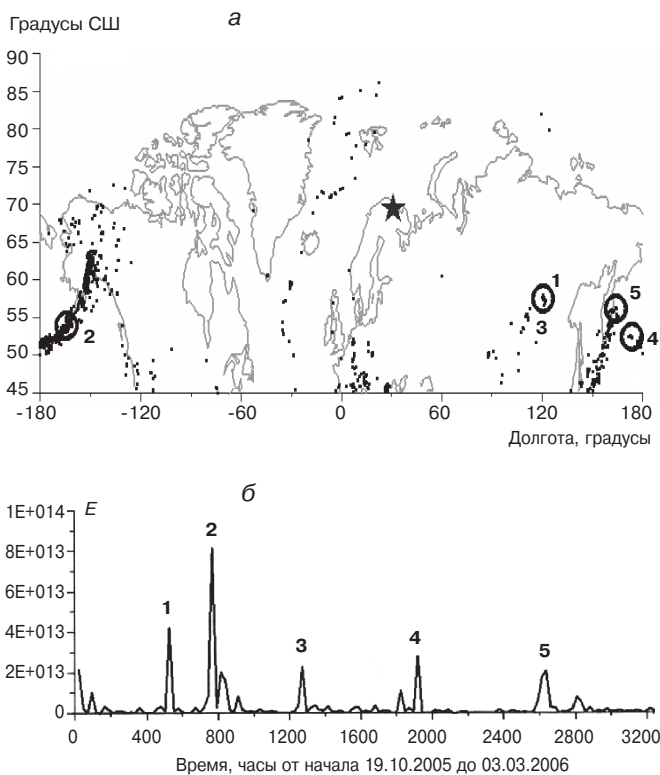


Рис. 4. Сейсмичность Северного полушария за период наблюдения 19.10.2005 г. - 03.03.2006 г. (а) и график выбросов сейсмической энергии для пяти сильных землетрясений (б): звездочкой обозначено положение Кольской СГ-3; залитые квадраты - эпицентры землетрясений; 1 - 5 - события, характеризующиеся наиболее сильным ежедневным выделением энергии

за данных, результаты применения которого мало зависят от отклонения от исходных предположений о виде данных. Чаще всего под такими отклонениями имеют в виду наличие выбросов. При использовании вейвлетов выбросы естественным образом возникают в получающихся вейвлет-коэффициентах, даже если они отсутствуют в исходных сигналах. Это связано с известной способностью вейвлет-разложений аккумулировать основную часть информации о сигналах в небольшом числе коэффициентов. На этом свойстве основаны популярные применения вейвлет-анализа для адаптивного к масштабу подавления шума и сжатия.

В качестве исходных данных для обработки были выбраны сигналы, представленные регистрограммами $M_1 - M_9$ (см. рис. 1), приведённые к интервалу дискретизации длительностью в 1 мин. (Интервал регистрации составлял с 07:10 19.10.2005 по 08:16 02.03.2006 и содержал 193027 отсчетов.) Сигналы M_1 и M_5 представляют собой записи интенсивности сейсмоакустической эмиссии в полосе с центральной частотой 30 Гц, зарегистрированные на глубине 3050 м и на поверхности, соответственно. Пары (M_2, M_6), (M_3, M_7) и (M_4, M_8) представляют собой сигналы интенсивности, зарегистрированные на глубине и на поверхности для центральных частот 160, 500 и 1000 Гц. Сигнал M_9 является записью сейсмических колебаний на глубине 3050 м в частотном диапазоне 0,3 - 10 Гц.

Проведённый анализ позволил выделить на общем фоне сейсмоакустических колебаний те из них, которые предположительно соответствуют удаленным землетрясениям. В верхней части рис. 4 представлена сейсмичность северного сектора Северного полушария за период наблюдения. Отмечены пять относительно сильных (класс 13,3 - 13,9) землетрясений, для которых выделенная энергия (вместе с афтершоками) в течение одних суток заметно превосходила фоновый уровень сброса энергии в результате сейсмических событий. Параметры этих пяти сейсмических событий представлены в таблице.

Для проведения анализа данных мониторинга было выбрано скользящее временное окно длиной 7 сут, или 168 ч. Такая длина временного интервала позволяет избавиться от недельной периодичности антропогенных помех. В нижней части рис. 4 приведён график выбро-

Характеристики зарегистрированных сильных землетрясений

Номер	Долгота, градус	Широта, градус	Дата	Глубина эпицентра, км	Класс
1	120, 59	57, 47	10.11.2005	6	13, 6
2	164, 09	53, 84	20.11.2005	30	13, 9
3	120, 76	57, 44	11.12.2005	10	13, 3
4	173, 61	52, 42	07.01.2006	30	13, 3
5	164, 20	56, 19	06.02.2006	24	13, 3

сов сейсмической энергии для выделенных землетрясений.

Совместный анализ интенсивности сейсмоакустической эмиссии в различных частотных полосах позволяет выделить предвестники удалённых сильных событий как всплески мер когерентного поведения. Для проверки устойчивости эффекта синхронизации перед сильными удалёнными землетрясениями необходим длительный (перманентный) непрерывный мониторинг сейсмоакустических сигналов. Использование для подобного рода мониторинга глубоких и сверхглубоких скважин даст возможность решать не только сейсмологические задачи, связанные с распознаванием признаков предстоящих землетрясений, но и задачи, которые напрямую не связаны с сейсмической активностью, например, оборонные.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 08-05-00144.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Беляков А. С., Губерман Д. М., Жигалин А. Д. и др.*, 2007, Новые результаты мониторинга акустических шумов в Кольской сверхглубокой скважине: Докл. РАН, **412**, **2**. 1 - 4.
2. *Беляков А. С., Лавров В. С., Николаев А. В., Худзинский Л. Л.*, 1996, О вариациях фонового подземного звука: Докл. РАН, **348**, **3**. 383 - 386.
3. *Беляков А. С., Николаев А. В.*, 1993, Сейсмоакустические приёмники с магнитоупругим преобразованием: Изв. РАН. Физика Земли, **7**, 74 - 80.
4. *Беляков А. С., Николаев А. В.*, 1995, Методика сейсмоакустических наблюдений: Изв. РАН. Физика Земли, **8**, 79 - 89.
5. *Любушин А. А.*, 1998, Анализ канонических когерентностей в задачах геофизического мониторинга: Изв. РАН. Физика Земли, **1**, 59 - 66.
6. *Любушин А. А.*, 2000, Вейвлет-агрегированный сигнал и синхронные всплески в задачах геофизического мониторинга и прогноза землетрясений: Изв. РАН. Физика Земли, **3**, 20 - 30.
7. *Любушин А. А.*, 2002, Робастный вейвлет-агрегированный сигнал для задач геофизического мониторинга: Изв. РАН. Физика Земли, **9**, 37 - 48.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Аскольд Сергеевич БЕЛЯКОВ - ведущий научный сотрудник Института физики Земли РАН, кандидат техн. наук.

Давид Миронович ГУБЕРМАН - консультант ФГУДП НПЦ "Кольская сверхглубокая", доктор техн. наук.

Александр Дмитриевич ЖИГАЛИН - ведущий научный сотрудник Института геоэкологии РАН, кандидат геол.-минер. наук.

Вячеслав Степанович ЛАВРОВ - старший научный сотрудник Института физики Земли РАН.

Алексей Александрович ЛЮБУШИН - главный научный сотрудник Института физики Земли РАН, доктор физ.-мат. наук.

Валерий Аширович МУХАМЕДОВ - ведущий научный сотрудник Института физики Земли РАН, доктор физ.-мат. наук.

Алексей Всеволодович НИКОЛАЕВ - заведующий лабораторией Института физики Земли РАН, чл.-кор. РАН.

Александр Васильевич СЕВАЛЬНЕВ - старший научный сотрудник Института геоэкологии РАН.

Юрий Николаевич ЯКОВЛЕВ - главный геолог ФГУДП НПЦ "Кольская сверхглубокая", кандидат геол.-минер. наук.