

УДК 550.34

СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЙ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА ПО ДАННЫМ СКВАЖИННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА БИШКЕКСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ

© 2014 г. А. С. Закупин¹, Л. М. Богомолов², В. А. Мубассарова¹, П. В. Ильичев¹

¹Научная станция Российской академии наук, г. Бишкек, Киргизия

²Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия

E-mail: dikii79@mail.ru

Поступила в редакцию 05.06.2012 г.

После доработки 09.07.2013 г.

Представлены результаты регистрации сейсмоакустической эмиссии (САЭ) в скважинах Бишкекского геодинамического полигона (Тянь-Шань, Киргизия). Исследована спектральная структура сигналов САЭ и особенности вариаций интенсивности САЭ при проведении электромагнитных зондирований земной коры с помощью мощной электроразведочной генераторной установки (ЭРГУ-600-2). Статистические методы обработки записей САЭ адаптированы применительно к задаче выявления взаимосвязей с воздействием зондирующих импульсов тока, т.е. вкладом энергии в геосреду. Обнаружена реакция среды на сеансы электромагнитного зондирования, проводимые для мониторинга кажущегося электрического сопротивления горных пород. Реакция среды проявляется в виде прироста интенсивности САЭ (откликов на импульсы тока, возбуждаемые при этих зондированиях). Отклики САЭ относятся к той же группе эффектов — признаков внешнего влияния на деструкцию среды, — что и вариации сейсмичности в период пусков геофизических МГД-генераторов 1983–1989 гг. или экспериментальных зондирований 2000–2005 гг. Источники сигналов САЭ находятся на небольшой глубине по месту расположения геофона. Этим обусловлено различие между вариациями интенсивности САЭ и микросейсмичности при откликах на одно и то же воздействие.

Ключевые слова: сейсмоакустическая эмиссия, геофон, скважина, электромагнитные зондирования, спектр САЭ.

DOI: 10.7868/S000233371404019X

ВВЕДЕНИЕ

Влияние мощных импульсов электрического тока на процесс деструкции земной коры было установлено в работах [Тарасов, 1997; Тарасов и др., 1999] по данным об изменениях сейсмической активности (суточного числа событий N_D) на территории Гармского и Бишкекского полигонов после пусков геофизических МГД-генераторов. Последующие работы [Богомолов и др., 2005; Сычев и др., 2008; 2010; Турунтаев, Мельчаева, 2010; Смирнов, Завьялов, 2012] показали, что аналогичный эффект имеет место и при глубинных зондированиях с применением электроимпульсного источника (установки ЭРГУ-600-2). Во всех случаях устойчивые корреляции между кратковременным приростом N_D и электровоздействиями отмечались при зондированиях земной коры однополярными импульсами тока с достаточно большим вкладом энергии в геосреду. Используемый в предыдущих работах термин “энерговоздействие” (ЭВ) призван подчеркнуть это обстоятельство. Режим зондирований однополярными

импульсами тока, реализованный на Бишкекском полигоне с источником ЭРГУ-600-2 в период 2000–2005 гг., будем называть экспериментальным [Сычев и др., 2010].

Основной вклад в “синхронизацию” потока сейсмических событий с внешними ЭВ вносят вариации N_D после воздействия однополярных импульсов относительно большой длительности (свыше 9 с, согласно [Сычев и др., 2010; Богомолов и др., 2011]). В проведенной серии зондирований с помощью установки ЭРГУ-600-2 амплитуда тока не менялась, так что для таких длинных импульсов перенос заряда достигает максимальных значений. Эти результаты могли бы свидетельствовать об электрокинетических явлениях как ключевом звене механизма возбуждения откликов сейсмической активности. Стоит отметить, что “тонкие” эффекты электрокинетики сами по себе приводят лишь к изменению в движении жидкости в коллекторах. Но вторичные эффекты: смачивание контактирующих поверхностей отдельных блоков, поступление воды к устьям трещин вполне могут быть триггерами для подвижек на раз-

ных масштабах длин. Чувствительность трещинообразования в геоматериалах даже к небольшому увлажнению была продемонстрирована в экспериментах на образцах [Соболев и др., 2006].

Для лучшего понимания механизма формирования сейсмических откликов с задержкой после ЭВ представляют интерес измерения сейсмоакустической эмиссии в непосредственной близости от водоносных горизонтов при прохождении импульсов тока того же самого источника (ЭРГУ-600-2). Такие измерения проведены с помощью высокочастотных сейсмоприемников (геофонов), установленных в скважинах на территории Бишкекского геодинамического полигона (БГП). Источниками сигналов сейсмоакустической эмиссии (САЭ) в частотном диапазоне свыше 100 Гц являются подвижки при переупаковке зерен, растущие трещины, динамические явления при фильтрации жидкости (прорывы перегородок и т.п.). Все эти явления можно охарактеризовать как неупругие деформации неоднородной среды. Характерные размеры источников САЭ – от нескольких сантиметров до нескольких метров [Gregori et al., 2002; Pararo et al., 2002].

Сейсмоакустические сигналы изучались при расположении геофонов как у дневной поверхности [Беляков и др., 1999; 2002; Горбатиков и др., 2001; Закупин, 2010], так и в глубоких скважинах [Sharpe, 1942; Horton, 1943]. В работах [Гаврилов и др., 2006; Виноградов и др., 2009; Горбунова и др., 2009] обращено внимание, что геофлюидные системы (в частности, водозаполненные скважины) обладают особыми акустическими свойствами (аномальная дисперсия, низкие фазовые скорости), связанными с возможностью распространения в них интерфейсных волн. В предшествующих работах, за исключением [Гаврилов и др., 2006; Gavrilov et al., 2008], скважинные измерения САЭ связывались с такими динамическими факторами, как взрывы или вибросейсмические источники, но не с электромагнитными полями.

Отклики эмиссионных сигналов (вариации сейсмической и акустоэмиссионной активности) на воздействие электромагнитных импульсов были зарегистрированы и на километровом, и на сантиметровом масштабах [Сычев и др., 2008; Богомоллов и др., 2011]. Естественно предположить наличие откликов среды и на промежуточном (условно, метровом) масштабе. Предварительные результаты о чувствительности сейсмоакустической (геоакустической) эмиссии к электромагнитным воздействиям изложены в работе [Гаврилов и др., 2011]. Вопрос о влиянии зондирующих импульсов тока на САЭ требует более детального исследования, составной частью которого являются методические вопросы: совершенствование аппаратуры для непрерывной регистрации САЭ

при воздействиях внешних ЭМ полей, разработка и совершенствование алгоритмов и методик распознавания откликов САЭ. Задача настоящей работы – установить взаимосвязь между параметрами потока сигналов САЭ и сеансами глубинных зондирований земной коры на территории БГП биполярными импульсами тока, генерируемых установкой ЭРГУ-600-2 и подаваемых в зондирующий диполь [Волыхин и др., 1993].

Необходимо пояснить, каким образом эта задача увязывается с исследованиями возможности контролируемого воздействия на сейсмичность (согласно постановке вопроса в работах [Тарасов и др., 1999; Сычев и др., 2008; 2010]). В большинстве работ биполярные импульсы установки ЭРГУ-600-2 (т.е. обычные зондирования для мониторинга кажущегося сопротивления [Волыхин и др., 1993]) не рассматривались в качестве модельных воздействий, которые могут оказывать триггерное влияние на сейсмичность. Из-за особенностей расписания этих зондирований (каждый рабочий день проводится 6 сеансов длительностью около 15 мин) выделять эффекты, связанные с биполярными импульсами, значительно сложнее, чем, к примеру, отклики на пуски МГД-генераторов. Тем не менее, в недавних работах [Сычев и др., 2008; 2010; Богомоллов и др., 2011] обращено внимание на признаки определенного влияния биполярных импульсов на поток событий слабой сейсмичности. Влияние этих импульсов может проявляться на различных масштабных уровнях, в том числе и в диапазоне частот и характерных размеров источников САЭ. Поэтому гипотеза о вариациях САЭ в течение и (или) после обычных сеансов зондирований ЭРГУ-600-2 правомерна и не выпадает из контекста исследований триггерных эффектов от импульсов тока в геосреде. Проведение прямого эксперимента с однополярными импульсами тока (выше упоминалось, что они наиболее эффективны) запланировано на следующей стадии исследований.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Для измерения сейсмоакустической эмиссии (геоакустической эмиссии, по терминологии работ [Gavrilov et al., 2008; Закупин, 2010]) в скважинах в ИС РАН были разработаны и изготовлены герметичные зонды, в которых располагаются трехкомпонентные пьезокерамические датчики (геофоны) А1638 производства ЗАО “Геоакустика” [Geoacoustics, 2009]. Акустический контакт датчиков с цилиндрической стенкой зонда обеспечивается полуполицилиндрической прокладкой-волноводом. Исследовательский зонд прижимается к обсадной трубе скважины упругим элементом (рессорой).

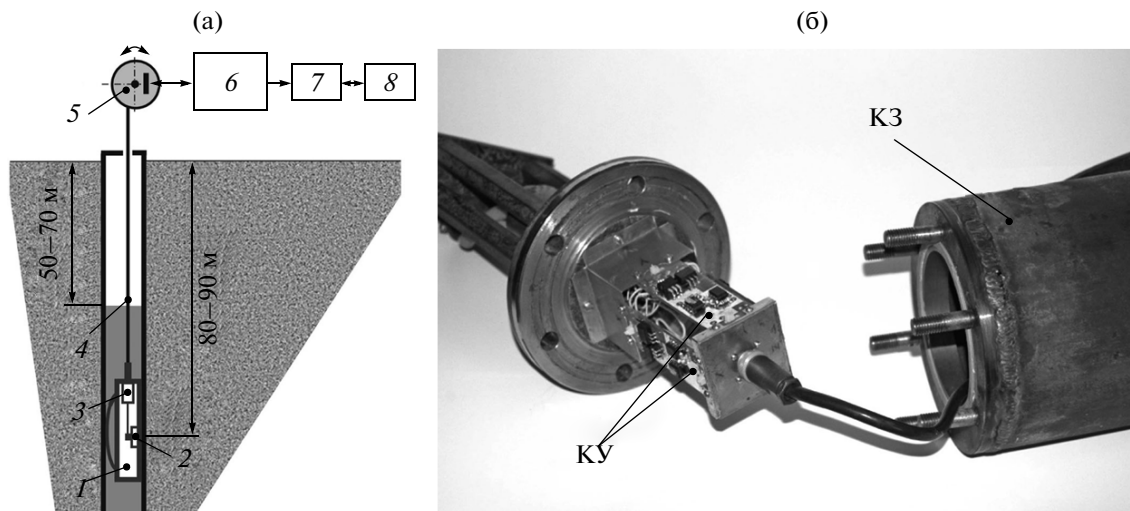


Рис. 1. (а) – Структурно-функциональная схема сейсмоакустического измерительного комплекса:

1 – скважинный герметичный зонд; 2 – трехкомпонентный геоакустический сейсмоприемник; 3 – блок кабельных усилителей (три независимых канала); 4 – кабельная линия связи; 5 – катушка для кабеля с лебедкой; 6 – блок основных усилителей-фильтров (три независимых канала); 7 – блок аналого-цифрового преобразования; 8 – полевой персональный компьютер (Netbook);

(б) – герметичный сейсмоакустический зонд, общий вид: КУ – платы кабельных усилителей; КЗ – корпус герметичного зонда.

Аппаратурное обеспечение измерений САЭ

На рис. 1а представлена структурно-функциональная схема сейсмоакустического измерительного комплекса.

Аппаратура комплекса состоит из двух частей: наземной и опускаемой в скважину. Скважинная часть аппаратуры, состоящая из датчика сигналов и блока кабельных усилителей, размещается непосредственно в зонде (рис. 1б). С наземной частью опускаемый в скважину зонд соединяется электрически с помощью специального многожильного экранированного кабеля длиной до 200 м. Сейсмоприемник обеспечивает преобразование сейсмических сигналов в электрическое напряжение, пропорциональное величине колебательного ускорения в частотном диапазоне от 0.2 до 400 Гц [Geoacoustics, 2009]. Осуществляется одновременное преобразование в электрический сигнал трех ортогональных компонент вектора колебательного ускорения.

Параметры сейсмоприемника, такие как коэффициент преобразования ($\approx 1 \text{ В с}^2 \text{ м}^{-1}$), уровень максимального измеряемого гармонического ускорения ($\approx 5 \text{ м с}^{-2}$) и уровень интегрального собственного шума в полосе пропускания (10^{-5} м с^{-2}), позволяют регистрировать сейсмоакустические сигналы в широком динамическом диапазоне от 3×10^{-5} до 5 м с^{-2} ($\approx 100 \text{ дБ}$).

Для неискаженной и помехоустойчивой передачи сигналов от сейсмоприемника через длинную линию связи на вход наземной части измери-

тельного комплекса в составе измерительного комплекса предусмотрен блок кабельных усилителей, размещенный рядом с сейсмоприемником в корпусе опускаемого в скважину герметичного зонда (рис. 1б). Выходные сигналы сейсмоприемника, пропорциональные регистрируемым трем ортогональным компонентам колебательного ускорения, поступают на входы трех идентичных кабельных усилителей. Схемы кабельных усилителей выполнены с применением малошумящих усилительных элементов (микросхемы производства фирмы Analog Devices, США), обладающих уровнем собственных шумов более чем в 20 раз ниже собственных шумов сейсмоприемника.

Сигналы с выходов кабельных усилителей через длинную линию связи поступают на входы блока основных усилителей (рис. 1а), обеспечивающего согласованный и помехоустойчивый их прием, дальнейшее усиление и необходимую для преобразования в цифровую форму предварительную фильтрацию по частоте.

В качестве блока аналого-цифрового преобразования (АЦП) применен модуль ZET 210 “Sigma USB”, изготовленный в ЗАО “Электронные технологии и метрологические системы” [Zetlab, 2010] и обеспечивающий многоканальную (до 16 каналов) регистрацию и измерение параметров сигналов в широком частотном (частота дискретизации до 500 кГц) и динамическом (90 дБ, 16 бит) диапазонах. Использовано базовое программное обеспечение ZETLab, поставляемое с модулем ZET 210 “Sigma USB”, позволяющее сразу после подклю-

Таблица 1. Технические характеристики сейсмоакустического измерительного комплекса

№ п.п.	Параметр	Ед. изм.	Значение	Примечание
1	Количество измерительных каналов	шт.	3	Измеряются три ортогональных компоненты вектора колебательного ускорения
2	Коэффициент преобразования датчика сигналов	В с ² /м	≈1	Согласно паспортным данным сейсмоприемника А1638
3	Интегральный шум датчика сигналов в полосе пропускания измерительного канала (ср. квадр.), не более	м/с ²	2×10^{-5}	По паспортным данным сейсмоприемника А1638
4	Нижняя граница полосы пропускания измерительного канала (F_H)	Гц	0.5 ± 0.05	Измеряется по уровню минус 3 дБ
5	Верхняя граница полосы пропускания измерительного канала (F_B)	Гц	380 ± 20	Измеряется по уровню минус 3 дБ
6	Подавление сигналов на частоте $2F_B$, не менее	дБ	34	
7	Подавление сигналов на частоте $2F_H$, не менее	дБ	6	
8	Коэффициент усиления кабельного усилителя в полосе пропускания	—	10 ± 0.5	Измеряется на частоте 20 Гц
9	Коэффициенты усиления основного усилителя в полосе пропускания	—	(512; 256; 128; 64) ±5%	Измеряется на частоте 20 Гц
10	Уровень ограничения выходного сигнала кабельного усилителя, не менее	В	±3.5	Измеряется на нагрузке 120 Ом при отсутствии видимых искажений сигнала
11	Уровень ограничения выходного сигнала измерительного канала, не менее	В	±8.0	Измеряется на нагрузке 2 кОм при отсутствии видимых искажений сигнала
12	Уровень среднеквадратичных шумов, приведенный к входу кабельного усилителя в полосе пропускания измерительного канала, не более	мкВ	1.0	
13	Потребляемый от аккумуляторных батарей напряжением ±12 В ток, не более	мА	150	

чения модуля к персональному компьютеру приступить к процессу регистрации и измерения параметров сигналов. В пакет ZETLab входят все необходимые программы для проведения испытаний и измерений, длительного мониторинга по нескольким измерительным каналам. Для регистрации и предварительной обработки сигналов применяется малогабаритный и малопотребляющий персональный компьютер типа "Netbook". Для питания блока АЦП и передачи цифровых данных от этого блока в компьютер используется последовательный порт USB 2.0. В табл. 1 приведены технические характеристики используемой сейсмоакустической измерительной аппаратуры.

Выбор измерительных пунктов и длительности измерений

Для измерений была выбрана скважина № 6623. Скважина находится недалеко от Иссык-Атинского разлома, проходящего в 4–5 км от нее. На рис. 2 показана схема расположения пункта измерений и диполя, являющегося нагрузкой для электроимпульсного источника ЭРГУ-600-2. Для качественного сбора данных благоприятно, что ближайшие высоковольтные линии электропередачи проходят не менее чем в 2 км от этой скважины. В спектрах регистрируемых сигналов практически отсутствуют составляющие от промышленной сети частотой 50 Гц и ее гармоники. Скважина № 6623 расположена на небольшом

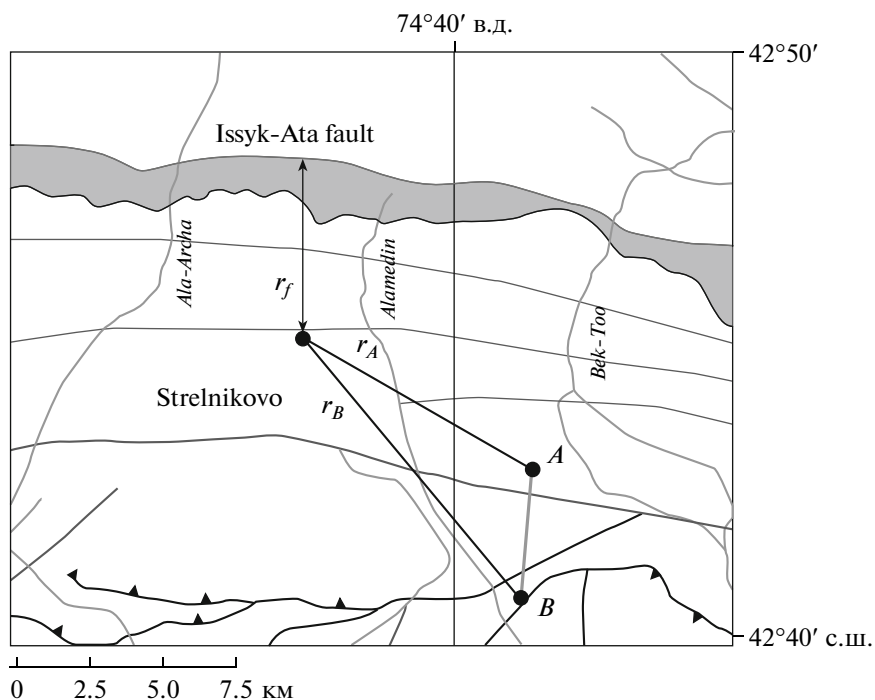


Рис. 2. Схема расположения скважины № 6623, в которой установлен геофон, и первичного диполя АВ. Разломы показаны согласно [Геологическая..., 2004]. Расстояния от скважины до полюсов диполя: $r_A = 6.77$ км, $r_B = 9.63$ км, расстояние от пункта наблюдений до Иссyk-Атинского разлома $r_f = 5$ км.

расстоянии от зондирующего диполя ($r_A = 6.77$ км от северного заземлителя, и $r_B = 9.63$ км от южного). Скважина обсажена на всю глубину –125 м. В течение периода измерений уровень воды находился на глубине 67–68 метров. Для измерений геофон был установлен на глубине 90 м. В данной скважине фильтрация воды происходит в зоне водоносного слоя, который охватывает ряд населенных пунктов (Горная Маевка, Кызыл-Бирлик, Стрельниково, Беш-Кунгей, Прохладное и др.) в зоне сочленения Киргизского хребта и Чуйской впадины. Этот слой характеризуется как водоносный среднечетвертичный-современный аллювиально-пролювиальный горизонт.

В 2011 и 2012 году был проведен ряд непрерывных измерений САЭ. Длительность измерений выбиралась с учетом расписания (режима) глубинных зондирований коры БГП токовыми импульсами установки ЭРГУ-600-2. При каждом сеансе зондирований в течение примерно 12–15 мин в диполь подаются двуполярные импульсы тока прямоугольной формы амплитудой 600 А, длительностью 5 с и периодом повторения 10 с. Описание конструкции диполя и системы зондирования в целом приведены в [Волыхин и др., 1993]. Для данной работы существенно лишь то, что ежедневно проводится шесть таких сеансов, кроме выходных и праздничных дней. С учетом этого для анализа корреляций параметров САЭ с сеансами электрзондирований длительность измере-

ний выбиралась не менее 5 сут (с общим количеством сеансов зондирований от 24 до 30).

Методы обработки сигналов САЭ

Исходные (первичные) данные представляют собой бинарные файлы получасовых записей, полученных с частотой оцифровки аналогового сигнала 1600 Гц. После конвертации в текстовый формат проводился первичный просмотр и обработка всех записей. Обнаружилось, что на фоне непрерывного шума САЭ, имеющего некоторый стабильный уровень, наблюдаются короткие импульсные сигналы большой амплитуды по форме огибающей очень похожие на сейсмические, регистрируемые измерительными станциями сети KNET, а по спектру более высокочастотные. Поэтому первоначальной задачей при анализе данных САЭ было сравнение спектрального состава упомянутых сильных сигналов и фоновой САЭ (непрерывного шума).

Результаты спектрального анализа (приведены ниже в разделе результаты) показали, что уместно рассматривать активность сигналов САЭ, выделенных на фоне шума, а также оценивать статистическую достоверность вариаций их активности. Был проведен подсчет количества этих сигналов за каждые полчаса регистрации и построены графики активности. В качестве порога для выделения сигналов “по превышению” было выбрано значе-

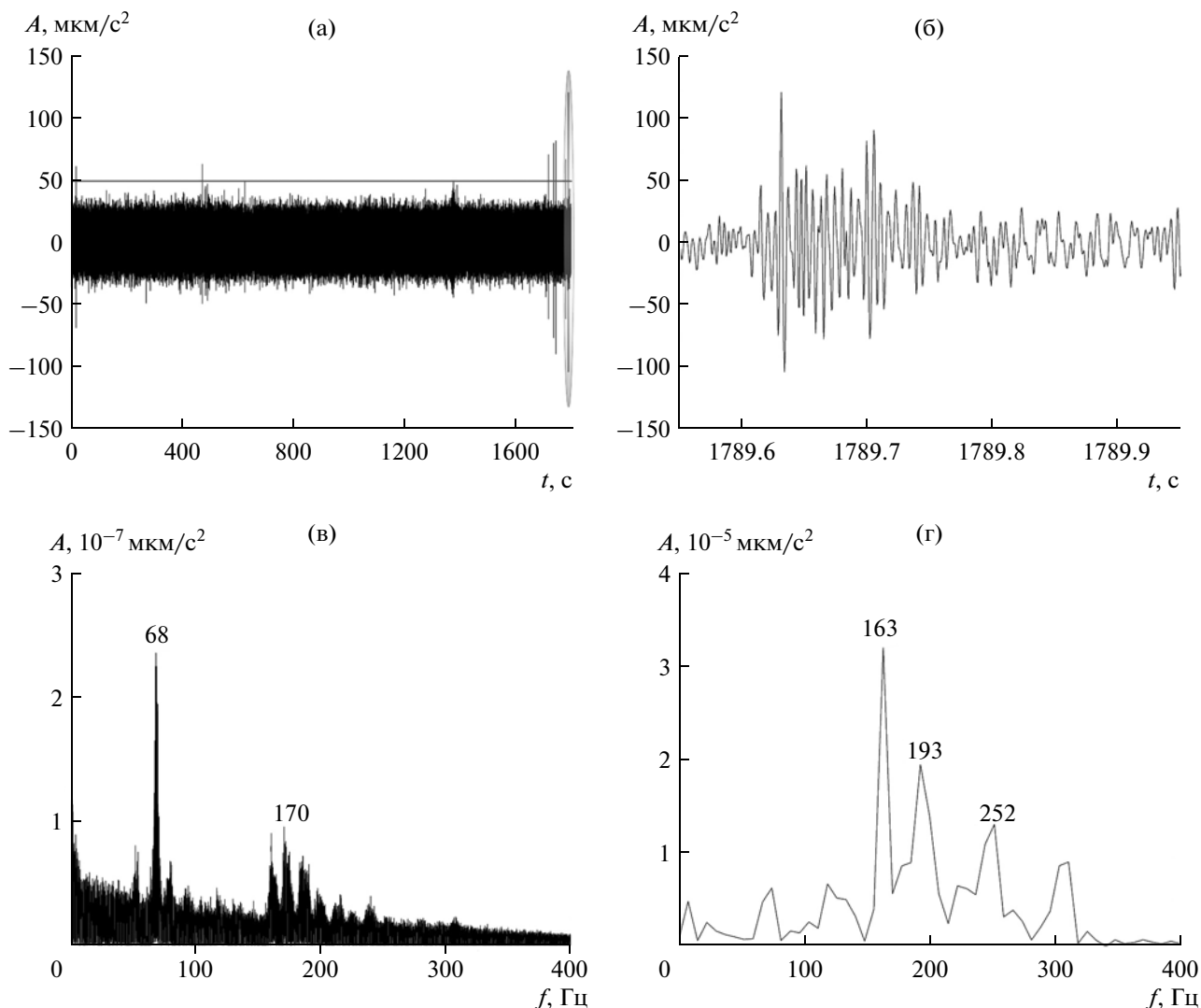


Рис. 3. Получасовая запись X компоненты (восток–запад) САЭ на скважине № 6623 за 29.09.2011 (а), ее спектр (в), сильный сигнал (б) и его спектр (г). Горизонтальной линией на рис. За выделен порог обнаружения сильных сигналов (3σ).

ние равное 3σ (σ – среднеквадратичный шум), обеспечивающее вероятность ложной тревоги при обнаружении импульсных сигналов, не превышающую 10^{-4} при нормальном законе распределения вероятности фонового шума.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Спектральный анализ сигналов САЭ

В 2011 году было проведено две кампании по длительным непрерывным измерениям. Первая проводилась с 29 сентября по 3 октября. Этот период включал 3 дня регистрации с 15 сеансами электрозондирования, а также двумя выходными днями. Вторая кампания длилась с 17 по 24 октября и охватила 3 нерабочих дня и 5 дней, в течение которых состоялось 27 зондирующих сеансов ЭРГУ-600-2. Из-

мерения показали, что фоновый уровень шума САЭ имеет величину порядка $30\text{--}70$ мкм/с², который от 3 до 7 раз превышает уровень собственных шумов геофона. На фоне указанного непрерывного шума наблюдаются импульсные сигналы, превышающие его по амплитуде. В спектре получасовых записей выделяются две полосы частот от 70 до 90 Гц, и от 150 до 250 Гц, в которых уровень спектральных составляющих заметно выше, чем на других частотах. Причем эти спектральные особенности САЭ не зависят от времени суток и других факторов. Рассмотрим структуру шума САЭ, а также отдельных высокоамплитудных (сильных) сигналов. Под сильными будем подразумевать сигналы, амплитуда которых превышает среднеквадратичный уровень шума (σ) более чем в 3 раза, на рис. За красной линией показан порог (3σ)

для их выделения. Начнем со спектрального состава таких сигналов. За 12 дней непрерывной регистрации в 2011 году было зарегистрировано более сотни сильных сигналов САЭ. В качестве примера на рис. 3б, 3г показан один из характерных сигналов и его амплитудно-частотный спектр, отражающий 95% всей выборки. На рис. 3 также приведены результаты регистрации и спектральной обработки одной из получасовых записей САЭ, полученных 29 сентября 2011 года. Показан шум, на фоне которого хорошо выделяются импульсные сигналы САЭ, превышающие порог (рис. 3а) и амплитудный спектр всей получасовой записи (рис. 3в). Как видно из рис. 3, в спектре одиночного типового сигнала в основном представлены частоты от 150 до 250 Гц. Оставшиеся 5% сигналов отличаются по спектру от показанного на рис. 3г присутствием дополнительных частотных полос 70–90 и 300–315 Гц, также имеющих повышенный уровень спектральных составляющих.

В 2012 году на скважине № 6623 были продолжены работы по измерению САЭ почти в тот же самый период, что и в 2011 году, причем измерения проводились в однокомпонентном (31 августа–5 сентября) и трехкомпонентном режимах. Будем придерживаться обозначений: компонента Z направлена вертикально соосно скважине, компонента X направлена по горизонтали от оси скважины к месту контакта корпуса зонда с обсадной трубой, а Y – тоже по горизонтали, перпендикулярно плоскости ZX . Приведем данные первых трехкомпонентных измерений в режиме однодневной регистрации (сутки с 31 октября по 1 ноября). На рис. 4 показаны полные получасовые записи сейсмоакустического шума по трем компонентам и их амплитудно-частотные спектры. Как видно из графиков, спектр шума САЭ, который в обоих случаях отражает 99% выборки, претерпел небольшие изменения. Можно выделить группы частот в нижней части спектра (до 100 Гц) и в верхней (выше 100 Гц), однако эти частоты в 2012 году смещены на 15–30 Гц вверх по сравнению с 2011.

С 9 по 16 ноября 2012 года были проведены трехкомпонентные измерения в режиме недельного мониторинга. На рис. 5 показаны записи САЭ и их спектры для всех трех компонент за 12 ноября в ночное время с 2 ч до 2 ч 30 мин. Большинство характерных частот повторяются в спектрах шума на всех компонентах, а общий вид спектров идентичен на протяжении всего периода регистрации, включая ночное и дневное время, а также периоды электростимуляций. Общий вид подразумевает взаимное расположение характерных частот, вероятнее всего связанных с резонансами обсадной трубы. Такие спектры были построены для десятка произвольных получасовых записей, кроме того, для одной получасовой записи спектр строился по минутно в скользя-

щем окне, все спектры оказались идентичны в следующем. После установки измерительного зонда в скважине регистрируется шумовой фон обсадной трубы, спектр которого содержит области с характерными частотами, которые не меняются во времени до 10 дней (на больших периодах измерения не проводились). Отметим, что все измерения в трехкомпонентном режиме показывают, что Z – наиболее интенсивная компонента, а самая слабая – Y . На графиках спектров можно также отметить ряд характерных частот в НЧ диапазоне, однако они, в отличие от резонансных частот, не присутствуют в спектрах постоянно.

Можно отметить, что спектры получасовых записей, зарегистрированных в период 9–16 ноября близки спектрам, полученным 31 октября–1 ноября, в плане наличия диапазона средней группы характерных частот, лежащих в диапазоне от 100 до 250 Гц. Как мы убедились, в течение недели группы резонансных частот практически не изменяются и зависят только от физических свойств обсадной трубы, характера контакта датчика с трубой и, возможно, еще от ряда факторов, не имеющих отношения к геосреде непосредственно. В тоже время, очевидно, что колебания обсадной трубы связаны с упругими колебаниями в околотрубном пространстве и жидкости внутри самой трубы. Стабильность резонансных частот позволяет обоснованно в дальнейшем применить узкополосную фильтрацию, как на аппаратном, так и на программном уровне. Построение спектров также позволило выявить некоторые особенности, которые могут иметь отношение к проявлениям реакции среды на сеансы зондирования. В отличие от постоянных резонансных явлений (рис. 6а) в спектрах во время проведения сеансов ЭВ иногда выделяются НЧ гармоники, в частности появляются спектральные линии 4.27 и 12.5 Гц. Появление первой произошло непосредственно во время начала первого сеанса ЭРГУ 1 ноября (рис. 6б) и она была заметна в течение трех часов.

Наличие этой гармоники в спектре отмечалось также в период с 15:30 до 16:30 31 октября, однако в процессе электростимуляций она существовала намного дольше, и, главное – время ее появления было синхронизировано с первыми минутами первого сеанса. Установлено, что гармоника с частотой $f = 4.27$ Гц появляется в 08:12 спустя 4 мин от начала сеанса ЭРГУ. Вторая НЧ гармоника частотой 12.5 Гц также наблюдалась в ходе ЭВ, данные по этим двум частотам сведены в табл. 2. Аналогично Z компоненте, в спектрах сигналов X и Y появление данных гармоник также имеет место.

Отклик САЭ на зондирующие импульсы по данным широкополосных измерений

С учетом сказанного, основное внимание было уделено анализу активности сейсмоакустиче-

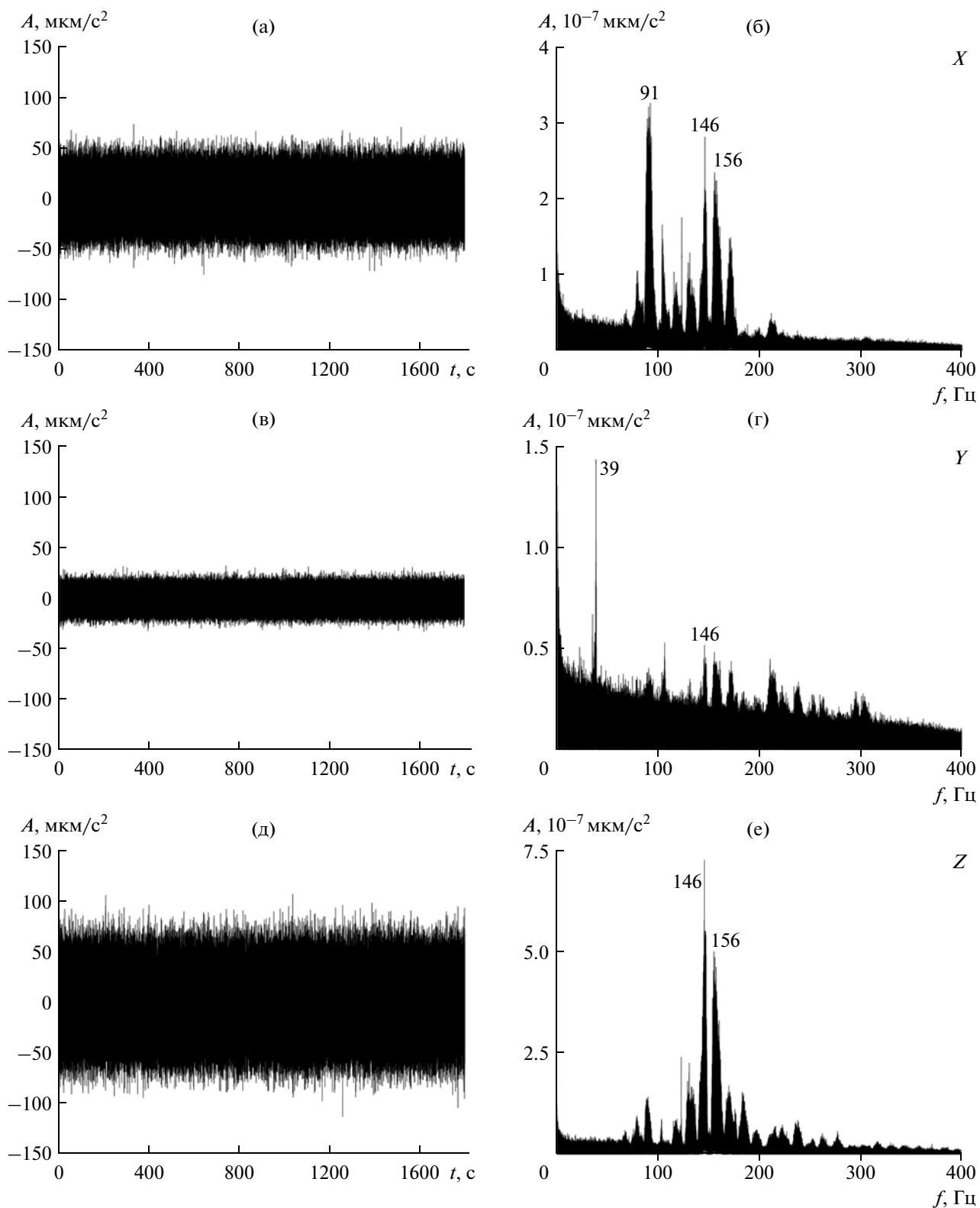


Рис. 4. Получасовая запись САЭ за 01.11.12 на скважине № 6623 (а), (в), (д) – временные распределения X , Y , Z компонент; (б), (г), (е) – их спектры соответственно).

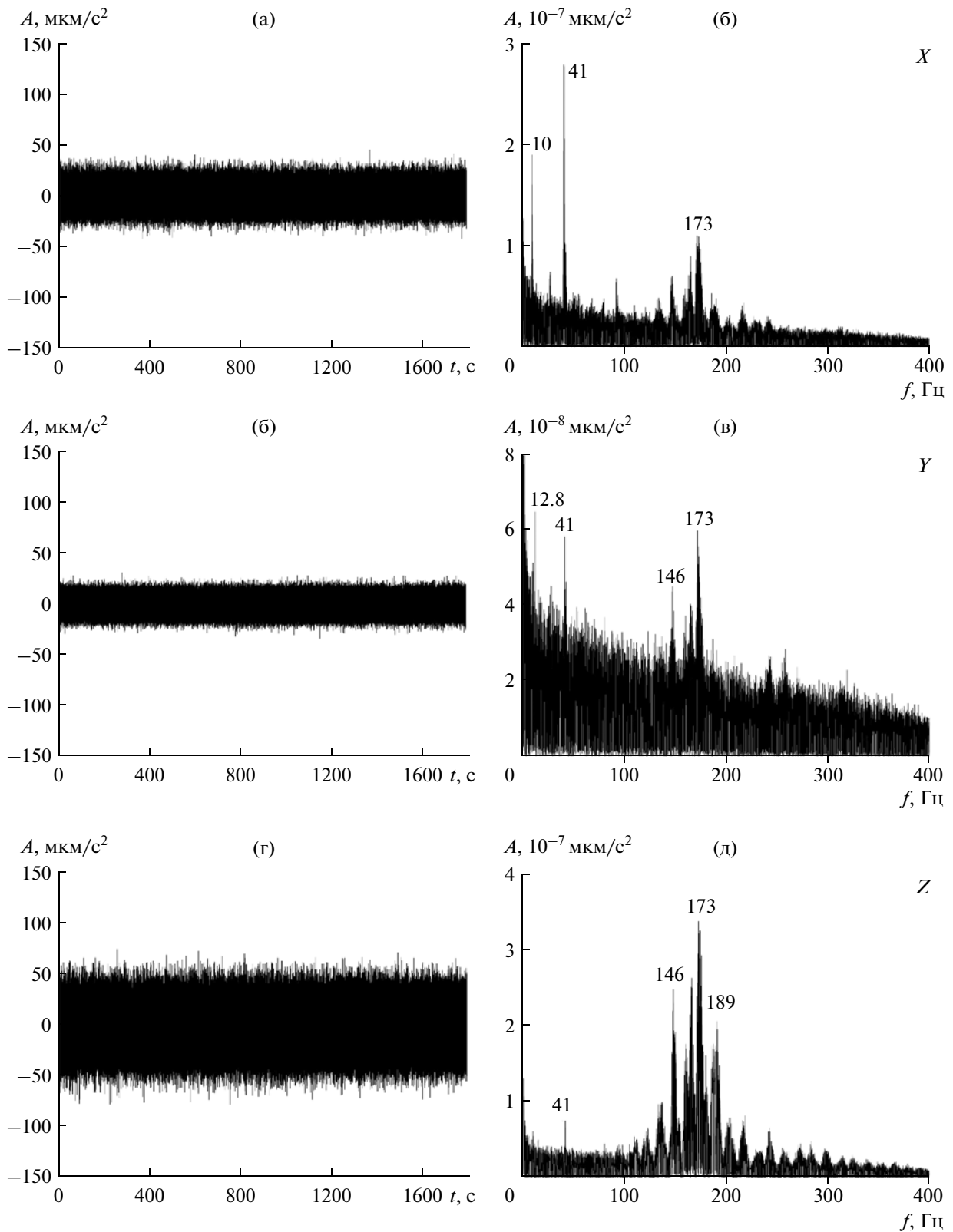


Рис. 5. Получасовая запись САЭ за 12.11.12 на скважине № 6623 (а), (в), (д) – временные распределения X, Y, Z компонент; (б), (г), (е) – их спектры соответственно.

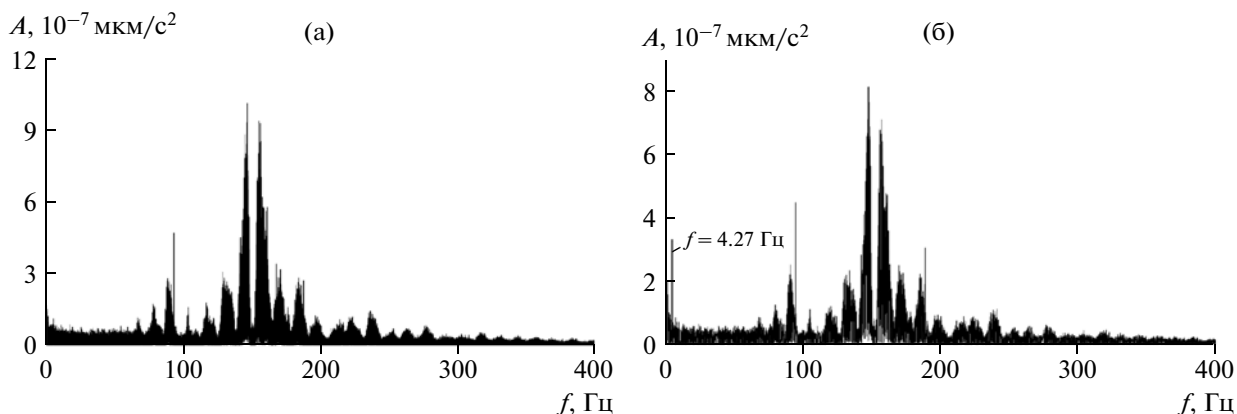


Рис. 6. Спектр записи САЭ 01.11.12 на скважине № 6623: (а) до 1-го сеанса ЭРГУ (08:00–08:08); (б) в период 1-го сеанса ЭРГУ (08:08–08:22).

ских сигналов, амплитуда которых превышала среднеквадратичный уровень шума более чем в 3 раза. В ходе измерений отслеживались любые наведенные “не из Земли” сигналы и фиксировались для дальнейшей отбраковки. Одним из главных вопросов может быть: “А отличаются ли сильные сигналы друг от друга в зависимости от того, зарегистрированы ли они непосредственно в периоды электроразондирований или нет, и если отличаются, то чем?”. Ответ приведен ниже: на рис. 7б показана акселерограмма сильного сигнала САЭ по компоненте Z, который зарегистрирован во время электроразондирований. На рис. 7д для сопоставления по той же компоненте показан аналогичный сигнал, но по времени не совпадающий с сеансами зондирования. По спектральной плотности существенных отличий также нет (рис. 7в, 7е). По форме (типу) можно отметить, что в первом случае наблюдается сигнал релакса-

ционного типа, а во втором – акселерационного (плавное нарастание колебаний).

Сильные сигналы обнаруживались автоматически (в потоковом режиме) по превышению уровня дискриминации 3σ . Анализ взаимосвязи появления этих сигналов с периодами сеансов ЭРГУ-600-2 проводился путем подсчета сигналов за каждый получасовой период регистрации и построения гистограмм активности. Как показали результаты обработки, оценку отклика среды на сеансы электроразондирований возможно дать только интегрально для 6 часов, в течение которых производятся 6 сеансов (с 8:00 до 14:30). Это обусловлено задержкой отклика и недостаточным количеством надпороговых сигналов, т.е. событий САЭ, произошедших в течение одного отдельного сеанса. Аналогичное затруднение, связанное с задержкой сильных сигналов, проявляется и в экс-

Таблица 2. Распределение НЧ составляющих в спектре САЭ во времени 31.10.2012–01.11.2012

Дата		Наличие зондирования	$f = 4.27$ Гц	$f = 12.5$ Гц
31.10.2012	15:30–16:00	–	+	–
31.10.2012	16:00–16:30	–	+	–
31.10.2012	16:30–00:00	–	–	–
01.11.2012	00:00–08:00	–	–	–
01.11.2012	08:00–08:30	+	+	–
01.11.2012	08:30–09:00	–	+	–
01.11.2012	09:00–09:30	+	+	+
01.11.2012	09:30–10:00	–	+	+
01.11.2012	10:00–10:30	+	+	–
01.11.2012	10:30–11:00	–	+	+
01.11.2012	11:00–13:30	+	–	–

Примечание: (1) “+” – наличие НЧ в спектре; “–” – отсутствие НЧ в спектре. (2) Сеансы режимных зондирований проводились в периоды времен: 08:08–08:22, 09:08–09:22, 10:08–10:22, 11:08–11:22, 13:08–13:22.

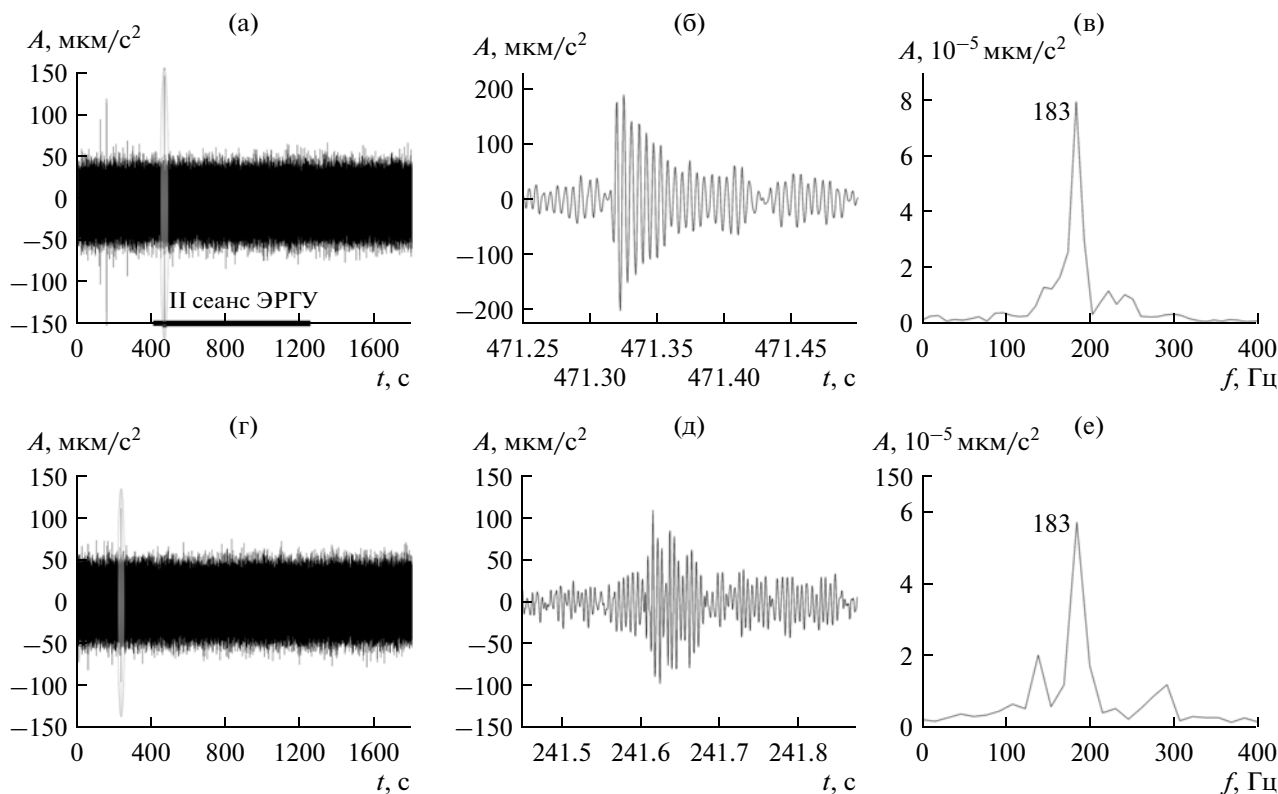


Рис. 7. Полу часовая запись Z компоненты САЭ на скважине № 6623 за 12.11.12 (а); сильный сигнал (б) и его спектр (в); запись Z компоненты САЭ в ночной период на скважине № 6623 за 11.11.12 (г); сильный сигнал (д) и его спектр (е).

периментах на нагруженных образцах геоматериалов [Закупин и др., 2006].

Для сопоставления были выбраны данные с регистрацией горизонтальной компоненты X в 2011 и 2012 году. Были построены кумулятивные распределения за периоды с 29 сентября по 3 октября 2011 года, с 17 октября по 24 октября 2011 года и с 31 августа по 5 сентября 2012 года. Результаты 2011 года показаны на рис. 8.

Как видно на рис. 8а, по количеству событий САЭ рабочие дни 29, 30 сентября и 3 октября в периоды проведения зондирований значительно отличаются от выходных. Так, например, 29 сентября в период с 11:00 до 11:30 (4-й сеанс) произошло 12 событий САЭ, причем это в сумме ровно столько же, сколько отмечено за субботу и воскресенье, вместе взятые. Период измерений с 17 по 24 октября 2011 года был выбран в основном из-за того, что согласно режиму работы НС РАН в 2011 году 21 октября зондирования не проводились. Отметим, что выходным он являлся только для НС РАН, а для Киргизии – обычным рабочим днем. Первый и последний день наблюдений не являются полными, так в понедельник 17.10.2011 регистрация началась после 11:00, а 24.10.2011 она закончилась в 15:00. Визуальный анализ данных, представленных на рис. 8б, показывает, что

активность САЭ увеличивается во время сеансов ЭВ. В общую тенденцию не укладываются следующие детали: в пятницу 21.10.2011 активность САЭ была ниже, чем в выходные; низкая активность была также во вторник 18.10.2011. Этот вторник – единственный из 8 дней регистрации, когда не было отклика САЭ.

Результат измерений 2012 года представлен на рис. 9, рис. 10. На рис. 9 на гистограмме показаны три выходных дня, а также два рабочих дня, когда проводились сеансы ЭРГУ. Как видно из графика, в первый рабочий день активность сигналов САЭ увеличилась не менее чем в 5–6 раз, в то же время нужно отметить и определенную активность САЭ в дни, когда сеансы не проводились. Рис. 9 демонстрирует, что активность возрастала во время сеансов зондирования.

Стоит отметить важную деталь: во второй день зондирований активность была даже ниже, чем в выходные дни. Сопоставим эти результаты с данными за октябрь 2011 года (рис. 8). На рис. 8б видно, что во второй день зондирований (вторник 18.10.2011) активность тоже низкая, хотя в первый день отклик не самый сильный. Проанализируем подробно данные за 3 сентября, для этого построим временные графики САЭ, результат приведен на рис. 11.

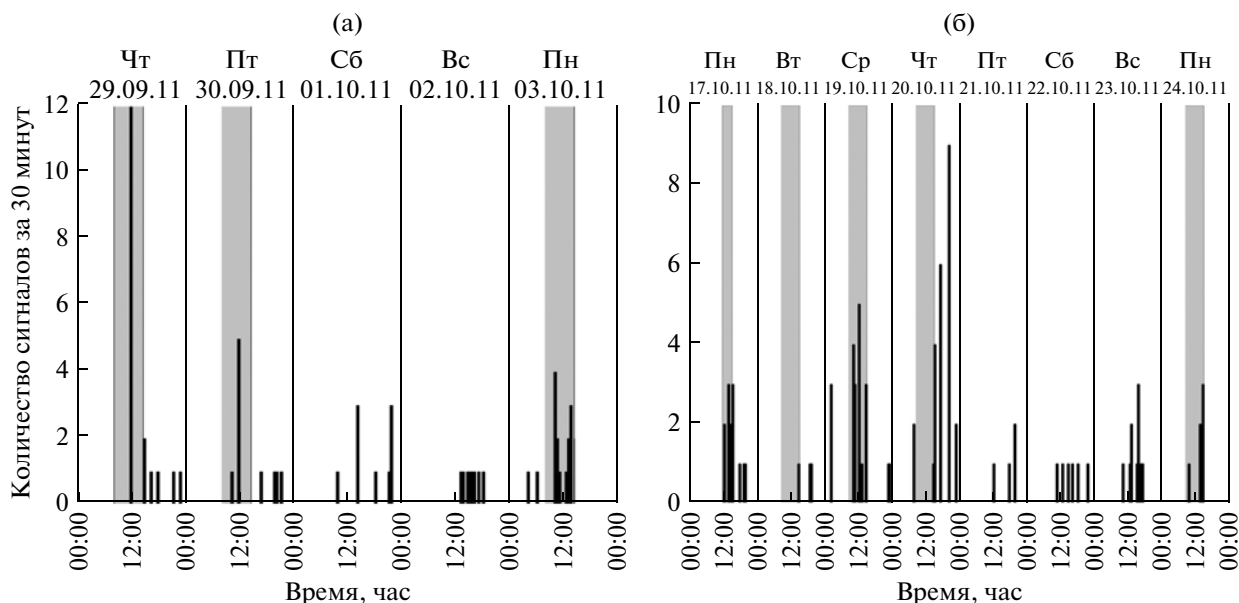


Рис. 8. Активность САЭ за периоды времени 29.09.11–03.10.11 и 17.10.11–24.10.11 (время от начала первого сеанса зондирования до конца последнего показано полосой).

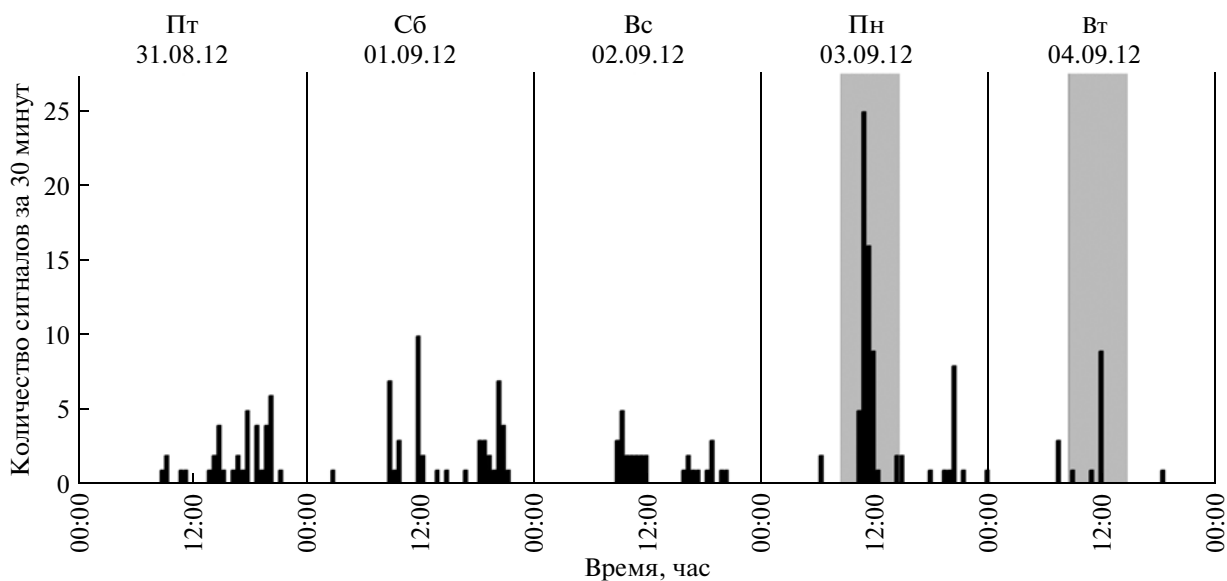


Рис. 9. Активность САЭ с 31.08.12 по 04.09.12 (полоса – то же, что и на рис. 8).

На рис. 11 хорошо видно, что после первого сеанса никаких изменений не происходит, после второго появились 2 заметных сигнала, а вот уже во время и после третьего сеанса они следуют группами. Примечательно, что влияние четвертого сеанса также заметно: появились два крупно-амплитудных сигнала. Серии сигналов САЭ продолжали появляться в течение 40 мин после окончания 4-го сеанса, а затем резко прекратились. После пятого и шестого сеансов зарегистрировано лишь несколько отдельных сигналов, т.е. прирост со-

всем небольшой по сравнению с сеансами 3, 4. Характерно, что в 2011 году активность сильных сигналов также начиналась к третьему сеансу. Вечерние активизации САЭ в рабочие и выходные дни по интенсивности значительно ниже выделенных во время сеансов зондирования ЭРГУ, повторяемость вечерних приростов интенсивности САЭ меньше. Важным моментом является и тот факт, что после всплесков активности на следующий день сеансы не дают эффекта, более того, наблюдается снижение активности, что видно из гисто-

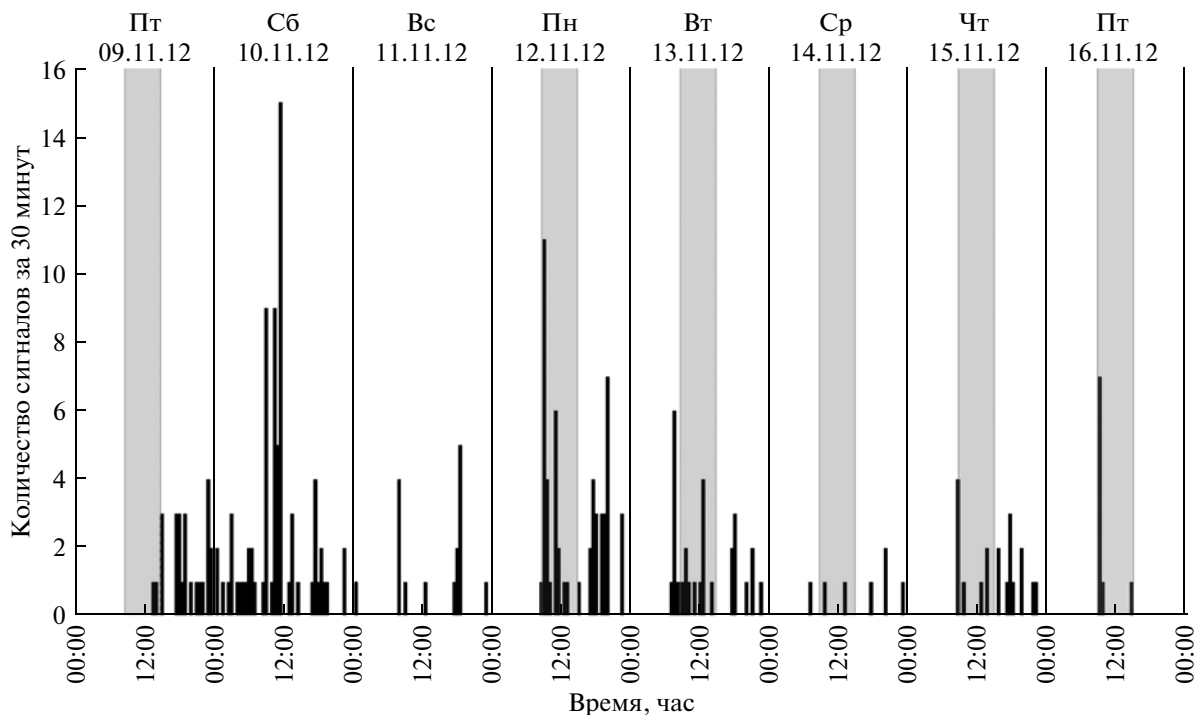


Рис. 10. Активность САЭ с 09.11.12 по 16.11.12 (полоса – то же, что и на рис. 8).

граммы накопления сигналов САЭ по данным за 4 сентября (рис. 9).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После анализа спектров отдельных сигналов САЭ и изменений активности САЭ (определяемой по потоку сильных сигналов) подведем итоги проделанной работы.

Широкополосные наблюдения позволили по данным скважинных измерений изучить особенности генерации сигналов САЭ, имеющих отношение к вопросу о влиянии электрозондирований. Акустические сигналы, зарегистрированные в обводненных неглубоких скважинах геофонами серии А16, имеют характерный частотный диапазон для каждой компоненты геофона. В то же время основная масса сигналов САЭ лежит в диапазоне от 150 до 270 Гц, частотные максимумы которого наблюдаются у всех пространственных компонент. Этому диапазону частот соответствуют длины волн порядка 10 м (скорость звука в осадочных породах у поверхности составляет 2–2.7 км/с). Тем самым подтверждается предположение, сделанное при постановке задачи о чувствительности геофона к источникам САЭ, находящимся на расстоянии не более десятков метров (сигналы от более удаленных источников САЭ затухают из-за сферической расходимости и поглощения в среде).

При обобщении данных о приросте активности САЭ при зондированиях обратим внимание, что среди всех дней с сеансами ЭРГУ-600-2 наибольшее количество сигналов САЭ в течение интервала с 8:00 до 14:30 зарегистрировано в первый день включения установки после двух или более суток без зондирований (выходных). В табл. 3 приведены данные о соотношении количества сигналов в течение этого интервала по понедельникам N и в предшествующие нерабочие дни. Согласно табл. 3, во всех четырех случаях N в понедельник заметно превышает среднее число сигналов САЭ в интервалах с 8:00 до 14:30 в предшествующие выходные дни. Отношение $N/N_{\text{ср}}$ больше 1.5 в трех случаях из четырех. В другие рабочие дни (вторник–пятница) столь высокой активности САЭ не отмечено. Таким образом, можно заключить, что обнаружены кратковременные сейсмоакустические отклики на воздействие импульсов тока, генерируемых установкой ЭРГУ-600-2, в сеансах зондирований после перерыва в несколько суток.

Наблюдения этих откликов САЭ естественно сопоставить с другими результатами о приросте активности эмиссионных сигналов (слабая сейсмичность территории БГП, акустическая эмиссия нагруженных образцов) под влиянием импульсных электромагнитных полей. Сравнение скважинных измерений САЭ с данными лабораторных измерений уже было проведено в работе [Гаврилов и др., 2011]. Для более детального срав-

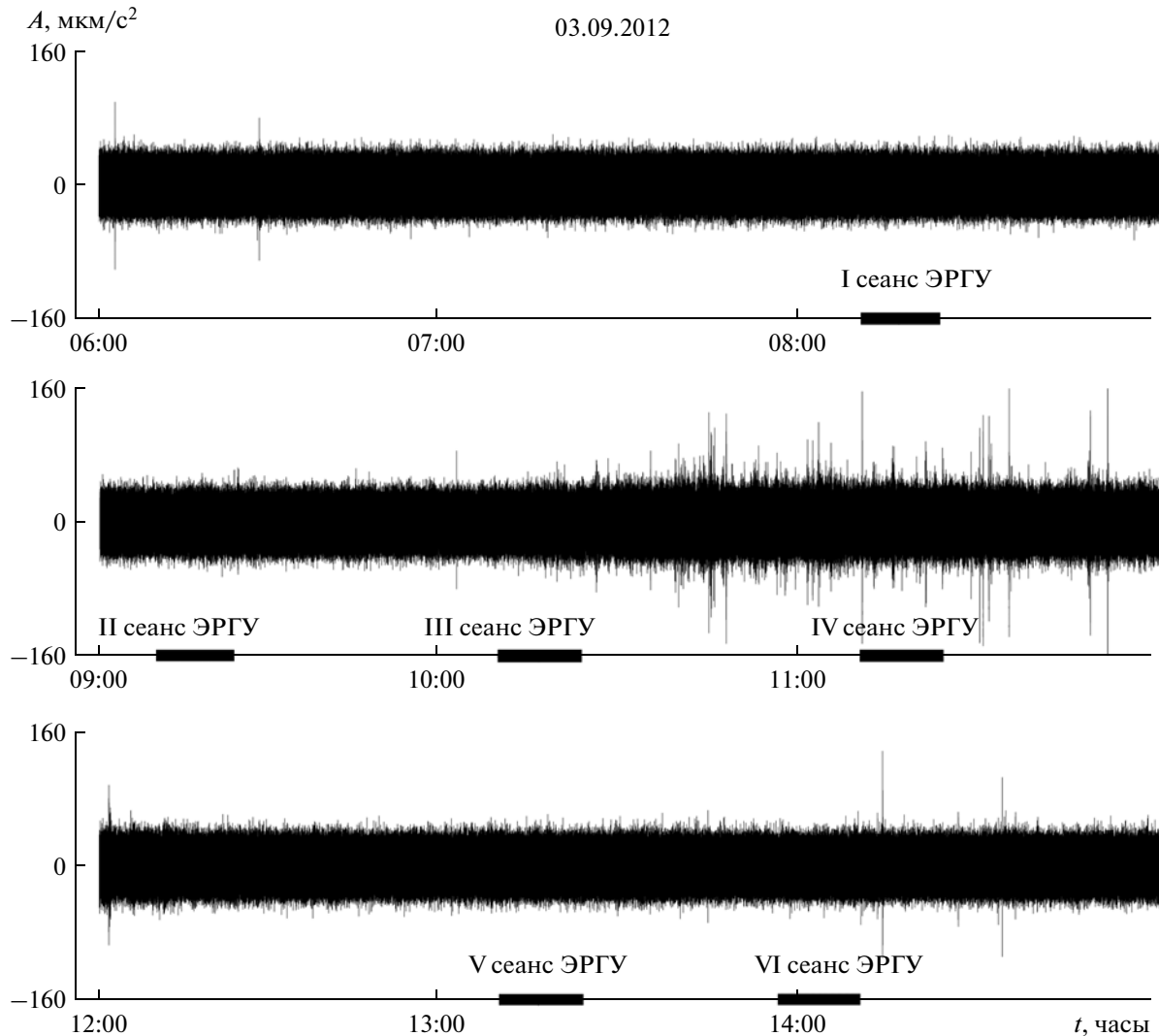


Рис. 11. Запись САЭ 03.09.2012 на скважине № 6623, черными барами указаны сеансы ЭРГУ.

нения результатов необходимы данные о воздействии биполярных электроимпульсов с крутыми фронтами на нагруженные образцы геоматериалов. Дело в том, что при моделировании на образцах прирост активности акустической эмиссии был надежно установлен для случая воздействий однополярных импульсов [Соболев, Пономарев, 2003; Bogomolov et al., 2004; Закупин и др., 2006], а при воздействии синусоидальных (биполярных) импульсов эффекта не обнаружено.

Согласно [Богомолов и др., 2005; 2011; Сычев и др., 2008; 2010], кратковременное увеличение суточного числа событий после зондирований в экспериментальном режиме (когда на диполь подавались однополярные импульсы с большей длительностью и энергией, чем в обычных сеансах) отмечено на большой территории вокруг источника (в пределах 41.5° – 43.5° с.ш., 73° – 76° в.д.) с задержкой 5–8 сут. Этот отклик интерпретировался

как проявление конечной реакции среды после нескольких стадий, подготавливающих сейсмические подвижки за счет изменения притока воды в зону межблоковых контактов и т.п. Важно отметить, что экспериментальные сеансы зондирования в период 2000–2005 гг. проводились в дополнение к обычным, “мониторинговым”. На первых стадиях, т.е. в период задержки активации, воздействие на среду биполярных (обычных) импульсов тока могло иметь значение для эффекта сейсмического отклика. Однако этот вопрос не рассматривался в цитированных выше работах. Отклик САЭ зарегистрирован вблизи источника – диполя – при обычных зондированиях. Время задержки отклика САЭ можно оценить лишь приблизительно, по порядку величины, поскольку проводится 6 сеансов зондирования (по рабочим дням, с 8:00 до 14:30). Если привязаться к началу первого сеанса

Таблица 3. Отклик САЭ на сеансы зондирования, проводимые после пауз

Дата	Статус	N за период с 8:00 до 14:30	$N_{\text{ср}}$ за 2 дня выходных	$N/N_{\text{ср}}$
31.08.2012	Выходной	8		
01.09.2012	Выходной	24	21	
02.09.2012	Выходной	18	21	
03.09.2012	Рабочий	53		3.2
10.11.2012	Выходной	45	23.5	1.9
11.11.2012	Выходной	2	23.5	0.1
12.11.2012	Рабочий	27		1.2
01.10.2011	Выходной	4	3	1.3
02.10.2011	Выходной	2	3	0.7
03.10.2011	Рабочий	12		4
21.10.2011	Выходной	1		
22.10.2011	Выходной	3	3.5	0.9
23.10.2011	Выходной	4	3.5	1.1
24.10.2011	Рабочий	6		1.7

3.09.12, т.е. в первый рабочий день, то, согласно рис. 9, задержка составляет $(5-10) \times 10^3$ с.

Сходство между вариациями интенсивности САЭ и суточного числа сейсмических событий (в обоих случаях активация в период электрозондирования) естественно связывать с тем, что источник возмущения среды один и тот же – воздействие токовых импульсов ЭРГУ-600-2. Подчеркнем, что амплитуда тока при экспериментальных и обычных зондированиях была одинакова и равна 600 А. Различия в характеристиках откликов, вероятно, обусловлены разными методами регистрации сейсмических событий и САЭ (скважинные измерения).

Обнаруженные в данной работе отклики САЭ подтвердили, что биполярные импульсы тока могут оказывать влияние на процесс деструкции геосреды. Этот вывод согласуется с недавним результатом [Тарасов и др., 2013] о стимулировании локальной сейсмичности территории Северного Тянь-Шаня зондированиями ЭРГУ-600-2 в период после 2006 г. (проводимых в режиме биполярных импульсов). Ранее в некоторых работах [Сычев и др., 2008; Богомолов и др., 2011] такое влияние отмечалось по косвенным признакам. Информация об откликах САЭ как реакции среды на биполярные импульсы свидетельствует о возможности того, что для эффекта стимулирования сейсмичности при электрозондированиях коры БГП важным является сочетание различных

режимов воздействия: сначала биполярные импульсы, а потом однополярные, с увеличением вклада энергии (а не просто экспериментальные зондирования сами по себе). Другими словами, “электростимулирование” может быть кооперативным эффектом.

Настоящее исследование осуществлено частично благодаря грантам Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) №№ 10-05-00231_а, 11-05-00155_а, 11-05-12042_офи_м.

Авторы признательны Авагимову А.А., Гаврилову В.А. за обсуждения вопросов взаимосвязи скважинных измерений САЭ с проблемой механизма энерговоздействий, а также Брагину В.Д. и Борисову С.А. за обсуждение методических вопросов интерпретации измерений САЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беляков А.С., Гамбурцев А.Г., Лавров В.С., Николаев А.В., Худзинский Л.Л. Подземный акустический шум и его связь с приливными деформациями // Вулканология и сейсмология. 1999. № 12. С. 1002–1009.
- Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В., Худзинский Л.Л. Подземный фоновый звук и его энергетическая модель как компоненты системы прогноза землетрясений // Физика Земли. 2002. № 8. С. 57–64.
- Богомолов Л.М., Авагимов А.А., Сычев В.Н., Сычева Н.А. и др. О проявлениях электротриггерной сейсмичности на Бишкекском полигоне (на пути к активному сейсмоэлектрическому мониторингу). Активный геофизический мониторинг литосферы Земли / Под. ред. Гольдина С.В. Новосибирск: СО РАН. 2005. С. 112–116.
- Богомолов Л.М., Закупин А.С., Сычев В.Н. Электровоздействия на земную кору и вариации слабой сейсмичности. Lambert Academic Publishing, Saarbrücken: Reha GmbH. 2011. 408 с. ISBN 978-3-8465-1436-8. (Электронная книга).
- Виноградов Е.А., Марков В.К., Марков Д.В. и др. Экспериментальное исследование интерфейсных волн факторов. Проблемы взаимодействующих геосфер. Сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2009. С. 193–202.
- Вольхин А.М., Брагин В.Д., Зубович А.В. и др. Проявления геодинамических процессов в геофизических полях. М.: Наука. 1993. 158 с.
- Гаврилов В.А., Морозова Ю.В., Сторчеус А.В. Вариации уровня геоакустической эмиссии в глубокой скважине Г-1 (Камчатка) и их связь с сейсмической активностью // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 52–67.
- Гаврилов В.А., Закупин А.С., Богомолов Л.М. Сравнение скважинных геоакустических измерений с данными лабораторных и натуральных экспериментов по электромагнитному воздействию на горные породы // Физика Земли. 2011. № 11. С. 63–74.
- Геологическая карта Кыргызского хребта и Чуйской впадины. 2004. URL: http://www.kyrgyzstan.ethz.ch/fileadmin/download/quatarnary_removed_geological_map.pdf
- Горбатилов А.В., Молчанов О.А., Хаякава М., Уеда С. и др. Отклик акустической эмиссии на сейсмический процесс // Вулканология и сейсмология. 2001. № 4. С. 66–78.

- Горбунова Э.М., Кабыченко Н.В., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В., Свинцов И.С.* Исследование динамики подземных вод под воздействием внешних факторов. Проблемы взаимодействующих геосфер. Сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2009. С. 232–244.
- Закупин А.С., Богомолов Л.М., Сычев В.Н., Аладьев А.В. и др.* Взаимосвязь электрической поляризации и акустической эмиссии образцов геоматериалов в условиях одноосного сжатия // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 22–33.
- Закупин А.С.* Геоакустические наблюдения в скважинах на территории Бишкекского геодинамического полигона. Триггерные эффекты в геосистемах / Под ред. Адушкина В.В., Кочаряна Г.Г. Ин-т динамики геосфер РАН. М.: ГЕОС. 2010. С. 277–285.
- Смирнов В.Б., Завьялов А.Д.* К вопросу о сейсмическом отклике на электромагнитное зондирование литосферы Земли // Физика Земли. 2012. № 7–8. С. 63–88.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В., Кольцов А.В., Круглов А.А. и др.* Влияние инъекции воды на акустическую эмиссию при долговременном эксперименте // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 5. С. 608–621.
- Сычев В.Н., Авагимов А.А., Богомолов Л.М. и др.* О триггерном влиянии электромагнитных импульсов на слабую сейсмичность в связи с проблемой разрядки избыточных тектонических напряжений. Геодинамика и напряженное состояние недр Земли / Под ред. Опариной В.М. Новосибирск: ИГД СО РАН. 2008. С. 179–189.
- Сычев В.Н., Богомолов Л.М., Рыбин А.К., Сычева Н.А.* Влияние электромагнитных зондирований земной коры на сейсмический режим территории Бишкекского геодинамического полигона. Триггерные эффекты в геосистемах / Под ред. Адушкина В.В., Кочаряна Г.Г. Ин-т динамики геосфер РАН. М.: ГЕОС. 2010. С. 316–326.
- Тарасов Н.Т.* Изменение сейсмичности коры при электрическом воздействии // Докл. РАН. 1997. Т. 353. № 4. С. 542–545.
- Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А.* Воздействие мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность Средней Азии и Казахстана // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 152–160.
- Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Фроунд Ф.Т.* Изменение физических свойств коры под влиянием сильных электромагнитных полей. Триггерные эффекты в геосистемах. Тез. докл. 2-го Всероссийского семинара-совещания. М.: ИДГ РАН. 2013. С. 100–101.
- Турунтаев С.Б., Мельчаева О.Ю.* Анализ триггерных сейсмических процессов при помощи методов нелинейной динамики. Триггерные эффекты в геосистемах / Под ред. Адушкина В.В., Кочаряна Г.Г. Ин-т динамики геосфер РАН. М.: ГЕОС, 2010. С. 124–135.
- Bogomolov L.M., P'ichev P.V., Zakupin A.S. et al.* Acoustic emission response of rocks to electric power action as seismic-electric effect manifestation // Annals of Geophysics. 2004. V. 47. № 1. P. 65–72.
- Gavrilov V., Bogomolov L., Morozova Yu., Storcheus A.* Variations in geoacoustic emissions in a deep borehole and its correlation with seismicity // Annals of Geophysics. 2008. V. 51. № 5/6. P. 737–753.
- Geoacoustics – Интернет сайт ЗАО “Геоакустика”. 2009. URL: <http://geophone.narod.ru/GTX/ttx.html>
- Gregori G.P., Paparo G., Coppa U., Marsn J.* Acoustic emission in geophysics: a reminder about the method of analysis // Bull. Geophys. Teor. Appl. 2002. V. 43. № 1–2. P. 157–172.
- Horton C.W.* Secondary arrivals in a well velocity survey // Geophysics. 1943. № 8. P. 290–296.
- Paparo G., Gregori G.P., Coppa U., De Ritis R., Taloni A.* Acoustic Emission (AE) as a diagnostic tool in geophysics // Annals of geophysics. 2002. V. 45. № 2. P. 401–416.
- Sharpe J.A.* The Production of elastic waves by explosion pressures, parts I and II // Geophysics. 1942. № 7. P. 144–154. P. 311–321.
- Zetlab – интернет сайт ЗАО “Электронные технологии и метрологические системы”. 2010. URL: <http://www.zetms.ru>