

УДК 550.34

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ В СКВАЖИНАХ

А.С. Закупин

Представлены результаты регистрации сейсмоакустической эмиссии (САЭ) высокочастотными сейсмоприемниками в скважинах на территории Чуйской области (в 10–15 км от Бишкека, Кыргызстан). Исследована спектральная структура сигналов САЭ, в том числе и при взаимодействии трубы с сейсмическими волнами от удаленных землетрясений. Изучены особенности вариаций интенсивности САЭ в течение 5–7 дней в полевых экспериментах 2011–2012 гг.

Ключевые слова: сейсмоакустическая эмиссия; скважина; разрушение; активность сейсмоакустической эмиссии.

WIDEBAND SEISMOACOUSTIC MEASUREMENTS IN BOREHOLES

A.S. Zakupin

In the work the results of seismic acoustic emission (SAE) with high-frequency seismographs in boreholes on the territory of Chuy oblast (10–15 km from Bishkek, Kyrgyzstan) are presented. Spectral structure of SAE signals has been researched, including signals by a pipe interaction with seismic waves of distant earthquakes. Features of SAE intensity variations within 5–7 days under field conditions of the experiment have been studied.

Key words: seismoacoustic emission; borehole; fracture; seismoacoustic emission activity.

Введение. 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 [1]. Сейсмоакустические сигналы изучались при расположении геофонов как у дневной поверхности [2, 3], так и в глубоких скважинах [4, 5]. В работе [6] отмечено, 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 данной работе широкополосные измерения проведены с помощью высокочастотных сейсмоприемников (геофонов), установленных в скважинах на территории Чуйской области (в 10–15 км от Бишкека, Кыргызстан). Работа актуальна для Центральноазиатского региона и позволяет получить дополнительную информацию о механизмах эволюции очаговых зон на различных иерархических уровнях.

Методика исследований и измерительная аппаратура. Для измерения сейсмоакустической эмиссии в скважинах в ИС РАН были разработаны и изготовлены герметичные зонды, в которых располагаются трехкомпонентные пьезокерамические датчики А1638 производства ЗАО “Геоакустика”, г. Москва. Акустический контакт датчиков с цилиндрической стенкой зонда обеспечивается полуцилиндрической прокладкой-волноводом. Исследовательский зонд прижимается к обсадной трубе скважины рессорой. Аналоговая аппаратура представляет собой комплекс, который состоит из двух частей – наземной и опускаемой в скважину. Сейсмоприемник обеспечивает преобразование сейсмических сигналов в электрическое напряжение, пропорциональное величине колебательного ускорения в частотном диапазоне от 0,2 до 400 Гц. Осуществляется одновременное преобразование в электрический сигнал трех ортогональных компонент вектора колебательного ускорения. Параметры датчика, такие как коэффициент преобразования ($\approx 1 \text{ В}\cdot\text{с}^2\cdot\text{м}^{-1}$), уровень максимального измеряемого гармонического ускорения ($\approx 5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$) и уровень интегрального собственного шума в полосе пропускания ($10^{-5} \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$) позволяют регистрировать сейсмоакустические сигналы в широком

динамическом диапазоне от $3 \cdot 10^{-5} \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ до $5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ ($\approx 100 \text{ дБ}$). Для обеспечения неискаженной и помехоустойчивой передачи сигналов от сейсмоприемника через длинную линию связи на вход наземной части измерительного комплекса разработан блок кабельных усилителей, размещенный в корпусе зонда. Сигналы с выходов основных усилителей поступают на входы аналого-цифрового преобразователя, в качестве которого применен ZET 210, изготовленный в ЗАО “Электронные технологии и метрологические системы”, г. Москва. Для измерений была выбрана режимная гидрогеологическая скважина №6623, которая расположена на удалении около 4 км от населенного пункта Арашан, причем на таком же расстоянии находятся высоковольтные линии электропередач, что благоприятно с точки зрения качества получаемых данных. Скважина имеет глубину 125 м, обсажена, на период проведения измерений уровень воды находился на глубине 67–68 м. 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, Арашан, Беш-Кунгей, и др.) в зоне сочленения Киргизского хребта и Чуйской впадины. Этот слой характеризуется как водоносный среднечетвертичный-современный аллювиально-пролювиальный горизонт.

Результаты исследования. Как показали результаты измерений 2011 г. геофоном А1638 в режиме одноканальной регистрации вертикальной

компоненты, фоновый уровень САЭ имеет величину порядка $25\text{--}70 \text{ мкм}/\text{с}^2$, и это в 30 раз больше собственных шумов геофона. На фоне указанного шума есть сигналы, которые значительно превышают его по амплитуде. Спектр получасовой записи представляет собой группы полос от 70 до 90 Гц, а также от 150 до 250 Гц, причем эти спектральные особенности САЭ не зависят от времени суток и других факторов. Для примера мы взяли сигнал, который по спектральным характеристикам отражает 95 % всей выборки. На рисунке 1 показаны получасовая запись САЭ, волновая форма сигнала, превышающего фоновый уровень, а также спектры показанных записей.

Как видно, в спектрах в основном представлены частоты от 150 до 250 Гц. В 2012 г. измерения САЭ проводились почти в тот же период, что и в 2011 г. (на один месяц раньше), но регистрация проводилась в трехкомпонентном режиме. Рассмотрим результаты измерений с 9 по 16 ноября. Обратим внимание на спектры получасовых записей для каждой компоненты (рисунок 2).

Такие спектры были построены для десятка произвольных получасовых записей, кроме того, для одной получасовой записи спектр строился по минутно в скользящем окне, все спектры оказались идентичны. Этот результат согласуется со всеми предыдущими и говорит о том, что после обречения в обсадной трубе своего положения датчик регистрирует шум трубы на частотах, которые со временем (до 10 дней, на больших периодах из-

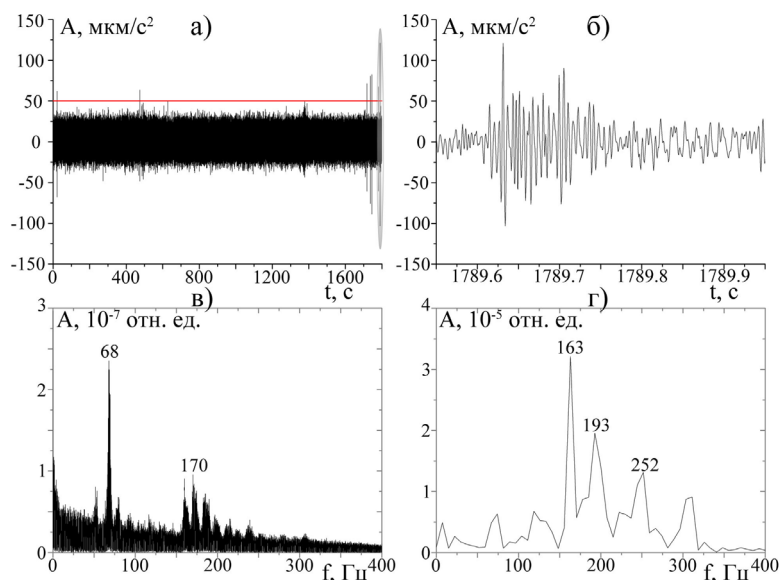


Рисунок 1 – Получасовая запись X компоненты (восток-запад) САЭ на скважине №6623 за 29.09.2011 (а), ее спектр (в), сильный сигнал (б) и его спектр (г). Красной линией выделен порог обнаружения сильных сигналов (3σ)

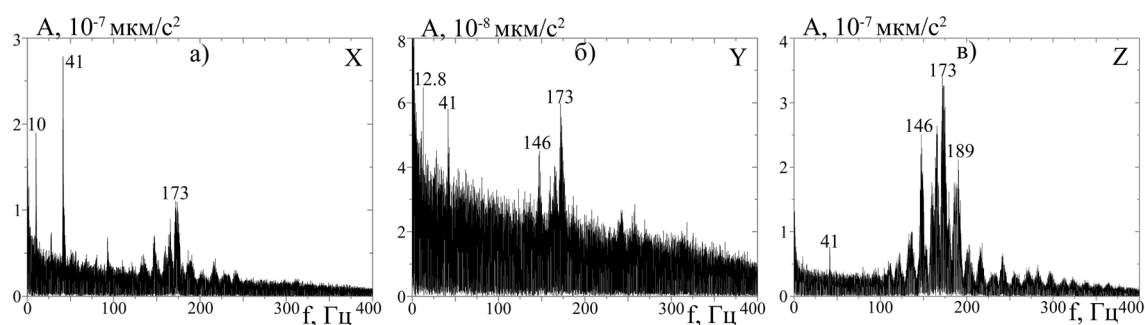


Рисунок 2 – Частотные спектры САЭ получасовых записей для трех компонент

мерений не проводили) остаются неизменными. Измерения показали, что Z – наиболее сильная компонента, а самая слабая – Y. Стоит обратить внимание на НЧ диапазон, где можно заметить отдельные спектральные линии, однако они, в отличие от резонансных частот, не присутствуют постоянно. Результаты спектрального анализа 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 значение равное $3s$ (s – среднеквадратичный шум), обеспечивающее вероятность ложной тревоги при обнаружении импульсных сигналов, не превышающую 10^{-4} при нормальном законе распределения вероятности фонового шума. Для примера покажем кумулятивные распределения за периоды с 29 сентября по 3 октября и с 17 октября по 24 октября 2011 г. (рисунок 3).

Возникает вопрос, могут ли реальные сейсмические сигналы иметь отображение в САЭ, кото-

рые в скважинах преимущественно представлены в высокочастотной области? Для ответа на данный вопрос интересно рассмотреть и низкочастотный диапазон спектра САЭ. В период проведения измерений САЭ на скважине №6623 в 2011 г. произошло несколько землетрясений (ЗЛТ) с магнитудой 4 и эпицентральной расстоянием до скважины менее 500 км [7]. Сведения об этих событиях приведены в таблице 1. Волновые формы ЗЛТ были зарегистрированы сейсмостанциями сети KNET [8]. Поскольку некоторые станции сети расположены неподалеку от пунктов измерения САЭ, интересно сравнить результаты одновременной регистрации сейсмоволн и сигналов САЭ, возбужденных одним и тем же источником. Для такого анализа мы использовали сейсмограммы землетрясений (таблица 1) по данным сейсмостанции Карагай-Булак (КБК), находящейся в 28,5 км от скважины №6623. Важно отметить, что сейсмометры STS-2, установленные на станциях сети KNET, являются датчиками скорости (диапазон частот 1–50 Гц), а геофон А1638 – акселерометр (диапазон частот 1–400 Гц). Ввиду этого различия при сравнении обращали внимание, прежде всего, на относительные изменения сигналов

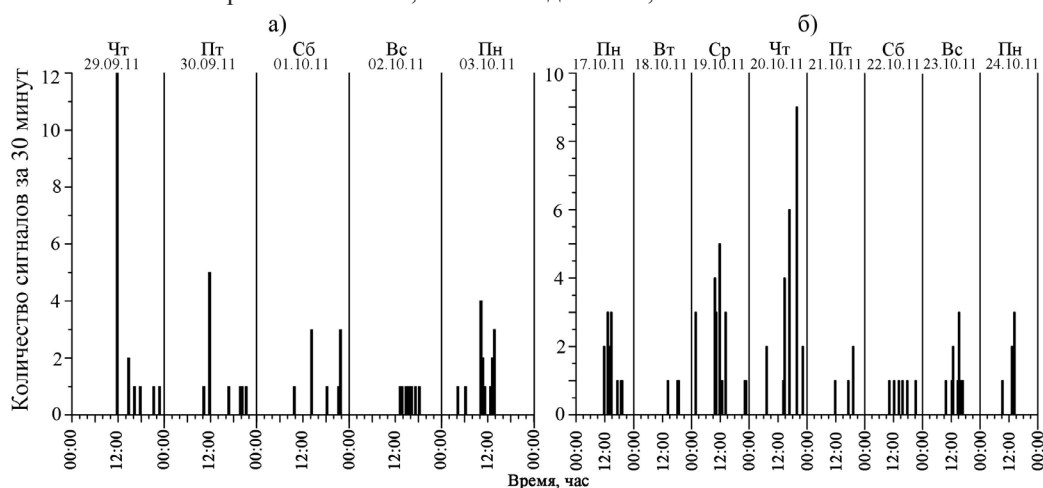


Рисунок 3 – Гистограммы активности САЭ

Таблица 1 – Список землетрясений 20–23 октября 2011 г. с эпицентрами внутри круга радиусом 500 км вокруг пункта наблюдений САЭ

Дата	Время (UTC)	Широта, N	Долгота, E	h, км	M	Район
20.10.2011	07:59:33.00	40.91	72.43	2	4.5	г. Андижан
20.10.2011	08:04:52.45	41.19	72.42	-	4.3	п. Майли-Сай
23.10.2011	09:19:48.00	39.49	71.72	39.7	4.5	г. Фергана
23.10.2011	23:17:36.53	43.13	76.84	1	3.7	г. Алматы

(наблюдается или нет значимая вариация). Сначала рассмотрим ЗЛТ 20.10.2011, $M=4.5$, произошедшее вблизи г. Андижан, Узбекистан, и последовавший за ним через 5 минут афтершок с $M=4.3$. По записям САЭ было отмечено вступление P и S волн [9], как для основного события, так и для его афтершока. Приход P и S волн выделялся как на исходных записях САЭ, так и на фильтрованных с применением вейвлет- и Фурье-преобразований. Волновые формы сигналов, зарегистрированные сейсмометром на станции КВК и геофоном, представлены на рисунке 4, между ними имеется сходство. При этом диапазон частот сигналов САЭ значительно отличается от характерного диапазона для трубного шума [5]. При обработке записи основного события после удаления высокочастотного шума стало возможным определить точное время, амплитуду первого вступления, длительность нарастания P волны. Значения этих параметров соответственно равны $A=-12,2$ мкм/с², $t=1739,2$ с, $T=11,5$ с. Максимальная амплитуда сигнала при этом составила 64,5 мкм/с². Основной спектр P волны находится в области ча-

стот от 4 до 12 Гц. Спектр S волны располагается в частотном диапазоне до 5 Гц, при этом выделяются две группы частот: 2–3 Гц и около 5 Гц. На записи геофона хорошо отражен процесс формирования и развития P и S волн землетрясения, как во времени, так и в частотном диапазоне.

Основной процесс при этом соответствует частотам от 4 до 12 Гц. Примечателен факт генерации в скважине трех сильных трубных сигналов (самый сильный в два раза выше фона) P волной ЗЛТ. Этот результат показан на рисунке 5. Разница от первого вступления P волны до появления первого трубного сигнала (170–190 Гц) 1 секунда, а до самого большого – 2 секунды (здесь центральная частота 181 Гц). А вот S волна трубные сигналы не сгенерировала. Менее заметно проявился отклик и в трубном шуме в полосе 70–90 Гц.

Перейдем к событиям 23.10.2011. Землетрясение, произошедшее в районе г. Алма-Аты, $M=3.75$, проявилось в записях САЭ. А вот ЗЛТ, произошедшее в 100 км южнее г. Ферганы, $M=4.5$ (таблица 1), не было идентифицировано среди шумовых

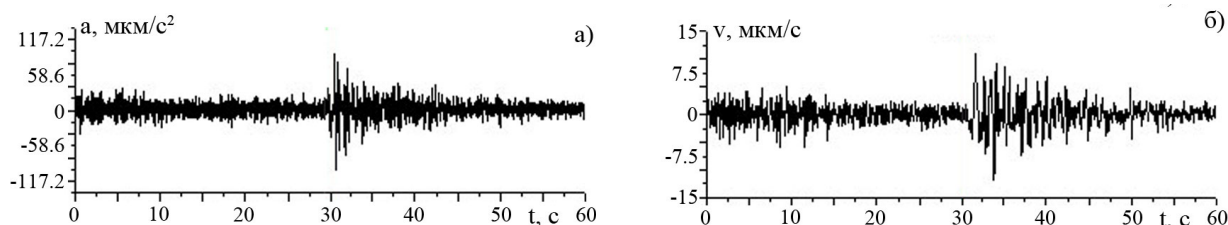


Рисунок 4 – Волновые формы сейсмического события (20.10.2011 в 07:59:33 UTC вблизи г. Андижан, Узбекистан, $M=4.5$, $h=2$ км): а – геофон в скважине №6623, б – сейсмостанция КВК сети KNET

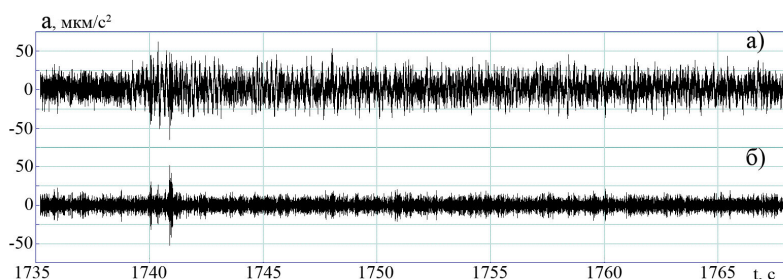


Рисунок 5 – а – P волна землетрясения в геоакустическом шуме, б – фильтрация сигнала, показанного на рисунке 4 а, в полосе 150–300 Гц

Таблица 2 – Сравнительные характеристики записей сейсмограмм на станции Карагай-Булак и сигналов САЭ в скважине № 6623

Землетрясение	Магнитуда ЗЛТ	v, нм/с	Глубина, км	Расстояние до пункта регистрации, км		A _{max} САЭ сигнала, нм/с ²
				скважина № 6623	сейсмостанция КВК (Карагай-Булак)	
20.10.2011 ЗЛТ (р-н г. Андижана)	4.5	11720	2	273.20	284.46	31038
20.10.2011 ЗЛТ (афтершок, р-н пос. Майли-Сай)	4.3	5320	-	255.74	268.16	13092
23.10.2011 ЗЛТ (р-н г. Фергана)	4.5	1260	39.7	436.72	443.96	-
23.10.2011 ЗЛТ (р-н г. Алматы)	3.7	2160	1	185.58	163.30	6483

записей (хотя были опробованы различные способы выделения).

В таблице 2 приведены характеристики сейсмограмм четырех рассматриваемых ЗЛТ и соответствующие амплитуды сигналов САЭ (за исключением Ферганского ЗЛТ). Как видно из данных таблицы, для ЗЛТ, которое не проявилось по данным САЭ, амплитудное значение скорости было в два раза меньше, чем у произошедшего в тот же день Алма-Атинского ЗЛТ. Стоит отметить, что Ферганское ЗЛТ также отличается от трех других по удаленности и глубине гипоцентра (таблица 2). Для ЗЛТ, которое геофон “не почувствовал”, гипоцентр лежит на самой большой глубине 37,7 км.

Заключение. Широкополосные наблюдения САЭ позволили изучить особенности распространения в скважине акустических волн. Установлено, что основная масса сигналов САЭ для конкретной скважины № 6623, расположенной на территории Чуйской области (Кыргызстан), имеет характерный диапазон частот от 150 до 250 Гц. Согласно структуре сигналов и ряду полевых опытов предполагается, что они относятся к разряду “трубных”, то есть резонансных частот обсадной трубы. Интенсивность сигналов САЭ во времени зависит от времени суток и максимальна в дневное и вечернее время. На примере трех ЗЛТ с приповерхностным расположением гипоцентров продемонстрировано возбуждение САЭ по частотным характеристикам близким к резонансам обсадной трубы. Изменения САЭ отмечены только для наиболее сильных ЗЛТ в 500 км зоне вокруг пункта наблюдений, поэтому на данный момент САЭ не может объясняться непосредственно микросейсмичностью (совпадением со слабыми сейсмическими событиями).

Литература

1. *Gregori G.P.* Acoustic Emission in geophysics: a reminder about the method of analysis / G.P. Gregori, G. Paparo, U. Coppa, J. Marsn // *Bull. Geophys. Teor. Appl.* 2002. V. 43. № 1–2. P. 157–172.
2. *Беляков А.С.* Подземный фоновый звук и его энергетическая модель как компоненты системы прогноза землетрясений / А.С. Беляков, В.С. Лавров, А.В. Николаев, Л.Л. Худзинский // *Физика Земли.* 2002. № 8. С. 57–64.
3. *Горбатиков А.В.* Отклик акустической эмиссии на сейсмический процесс / А.В. Горбатиков, О.А. Молчанов, М. Хаякава, С. Уеда и др. // *Вулканология и сейсмология.* 2001. № 4. С. 66–78.
4. *Sharpe J.A.* The Production of elastic waves by explosion pressures, parts I and II. / J.A. Sharpe // *Geophysics.* 1942. № 7. P. 144–154; P. 311–321.
5. *Horton C.W.* Secondary arrivals in a well velocity survey / C.W. Horton // *Geophysics.* 1943. № 8. P. 290–296.
6. *Горбунова Э.М.* Исследование динамики подземных вод под воздействием внешних факторов / Э.М. Горбунова, Н.В. Кабыченко, Г.Г. Кочарян, Д.В. Павлов, И.С. Свинцов // *Проблемы взаимодействующих геосфер: Сб. научн. трудов ИДГ РАН.* М.: ГЕОС. 2009. С. 232–244.
7. КНЦД – Интернет сайт Казахстанского национального центра данных ИГИ НЯЦ РК. 2011. <http://www.kndc.kz>
8. *Сычева Н.А.* Сейсмоструктурные деформации земной коры Северного Тянь-Шаня (по данным определений механизмов очагов землетрясений на базе цифровой сейсмической сети KNET) / Н.А. Сычева, С.Л. Юнга, Л.М. Богомолов, В.А. Мухамадиева // *Физика Земли.* 2005. № 11. С. 62–78.
9. *Аки К.* Количественная сейсмология: теория и методы / К. Аки, П. Ричардс. М.: Мир, 1983. 520 с.