

УДК 550.348;550.37

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ СКВАЖИННЫХ ГЕОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ С ДАННЫМИ ЛАБОРАТОРНЫХ И НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ НА ГОРНЫЕ ПОРОДЫ

© 2011 г. В. А. Гаврилов¹, Л. М. Богомолов², А. С. Закупин³

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

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

³Научная станция РАН, г. Бишкек

E-mail: vgavr@kscnet.ru

Проводится сопоставление данных скважинных геоакустических и электромагнитных измерений, проводимых на Камчатке, с материалами лабораторных и натуральных экспериментов по воздействию электромагнитного поля на горные породы. Отмечено значительное сходство наблюдаемых при этом реакций естественной геосреды и образцов горных пород. Из результатов натуральных экспериментов с искусственным источником электромагнитного воздействия следует, что отклики горных пород в условиях их естественного залегания при размещении геофонов в скважинах могут надежно регистрироваться уже при уровне напряженности воздействующего электрического поля порядка 0.5 мВ/м. Полученные результаты являются экспериментальным подтверждением ранее выдвинутой гипотезы о модуляции уровня геоакустической эмиссии горных пород в условиях их естественного залегания сверхнизкочастотным электромагнитным полем атмосферного происхождения.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно результатам скважинных геоакустических измерений, проводившихся в различных регионах [Николаев и др., 2005; Гаврилов и др., 2006; Gavrilov et al., 2008], временные ряды данных уровня геоакустической эмиссии (ГАЭ) во многих случаях содержат ярко выраженную суточную компоненту (24.0 ч) с максимумом в ночное время суток. В том числе, указанный эффект оказался присущим и для рядов измерений, полученных на скважинах Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона. Основной объем геоакустических измерений был получен на скважине Г-1 (53.05°N; 158.63°E) глубиной 2542 м, расположенной в черте г. Петропавловска-Камчатского. Непрерывные геоакустические измерения в диапазоне частот 25 Гц–1400 Гц на скважине ведутся с августа 2000 г. В мае 2003 г. на скважине были начаты непрерывные электромагнитные измерения в том же диапазоне частот с использованием подземной электрической антенны, основным элементом которой является обсадная труба скважины [Гаврилов и др., 2006]. Блок-схема системы геоакустических и электромагнитных измерений на скважине Г-1 представлена на рис. 1.

Для геоакустических измерений на скважине Г-1 использовались геофоны с датчиками на основе магнитоупругих кристаллических ферромагнетиков [Беляков, 2000] и с пьезокерамическими датчиками типа А1612, производства ЗАО “Геоакустика”. Крутизна амплитудно-частотной характеристики (АЧХ)

датчиков на основе магнитоупругих кристаллических ферромагнетиков составляет 60 дБ на декаду изменения частоты (вексельметрическая характеристика, измеряемый параметр — скорость ускорения). Датчики типа А1612 в рабочей полосе частот имеют плоскую по ускорению грунта АЧХ. Геофоны устанавливались на глубинах до 1035 м. Прижим корпуса геофона к обсадной трубе скважины на первом этапе осуществлялся механическим прижимом ресорного типа, в дальнейшем применялись геофоны с электромеханическим прижимом. Сигналы на выходах датчиков геофонов разделялись полосовыми третьоктавными фильтрами на четыре частотные полосы с центральными частотами 30, 160, 560 и 1200 Гц с получением на выходах каждого из фильтров сигналов, пропорциональных средним значениям входных сигналов с усреднением на одноминутном интервале. Как показано в [Гаврилов и др., 2006], при установке геофона на глубине около 1000 м влияние шумов техногенного происхождения ослаблялось более чем на два порядка, что позволяло измерять уровень естественного геоакустического фона с амплитудами сигналов в пересчете к смещению грунта менее 1×10^{-10} м.

Согласно полученным результатам на интервалах времени, соответствующих спокойной сейсмической обстановке в регионе, временные ряды уровня ГАЭ пункта Г-1 в полосах фильтрации 30 Гц и 160 Гц содержат ярко выраженную суточную компоненту (24.0 ч) с максимумом в ночное время суток. Суточ-

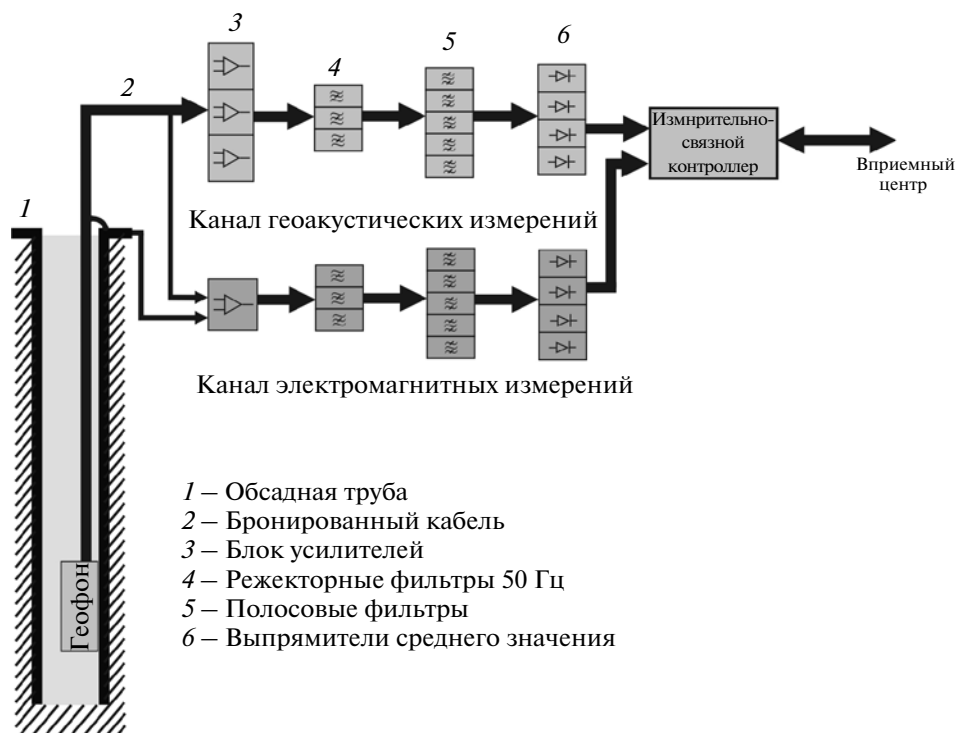


Рис. 1. Блок-схема геоакустических и электромагнитных измерений на скважине Г-1.

ная периодичность изменений уровня ГАЭ четко проявляется и в периодограммах вариаций уровня ГАЭ на каналах 30 Гц и 160 Гц. При этом для вертикальной компоненты ГАЭ уровень спектральной составляющей с периодом семь суток, характерной для шумов антропогенного происхождения, не более чем вдвое превышает уровень шумов на канале 30 Гц, а для канала 160 Гц находится на уровне собственных шумов измерительного тракта [Гаврилов и др., 2006].

По результатам синхронных геоакустических и электромагнитных измерений, полученных на скважине Г-1, было установлено, что в сейсмически спокойные периоды суточные вариации уровней ГАЭ и электромагнитного излучения (ЭМИ) в диапазонах 30 Гц и 160 Гц, регистрируемого с помощью подземной электрической антенны, практически идентичны, коэффициент корреляции ρ имеет значения порядка $\rho = 0.80-0.99$ (рис. 2) [Гаврилов, 2007]. За сутки и более перед сильными ($M_{LN} \geq 5.0$) близкими землетрясениями, а также в периоды релаксации коррелированность рядов уровней ГАЭ и ЭМИ значительно падает: ρ уменьшаются вплоть до нулевых значений. Полученные результаты позволили сделать вывод о физических причинах суточных вариаций уровня ГАЭ как следствия модулирующего воздействия ЭМИ на процессы, связанные с геоакустической эмиссией горных пород [Гаврилов, 2007].

Представляет значительный интерес сравнение данных, полученных при измерениях на разных

скважинах Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона. На рис. 3 приведены примеры результатов одновременных геоакустических и электромагнитных измерений для скважин Г-1 и Р-2. Скважина Р-2 глубиной 1504 м расположена в 20 км на северо-восток от скважины Г-1 на значительном удалении от источников техногенных помех. Геоакустические измерения на скважине Р-2 проводились на глубине 260 м с использованием геофона с пьезо-керамическим датчиком типа А1612 с регистрацией вертикальной компоненты ГАЭ. При этом проводилась широкополосная регистрация волновых форм геоакустических сигналов с использованием измерительного модуля Zet210 производства ЗАО "Электронные технологии и метрологические системы". В состав модуля Zet210 входит 16-разрядный АЦП, позволяющий проводить измерения по 16 синфазным или восьми дифференциальным каналам с суммарной частотой преобразования до 500 кГц. Приводимые на рис. 3б геоакустические данные по скважине Р-2 являются графиком изменений среднеквадратического значения (СКЗ) сигнала на входе геофона при одноминутном интервале осреднения после цифровой фильтрации третьоктавным фильтром с центральной частотой 160 Гц. Аппаратура для электромагнитных измерений, использованная на скважине Р-2, была аналогична аппаратуре, применявшейся на скважине Г-1. При этом также применялась подземная электрическая

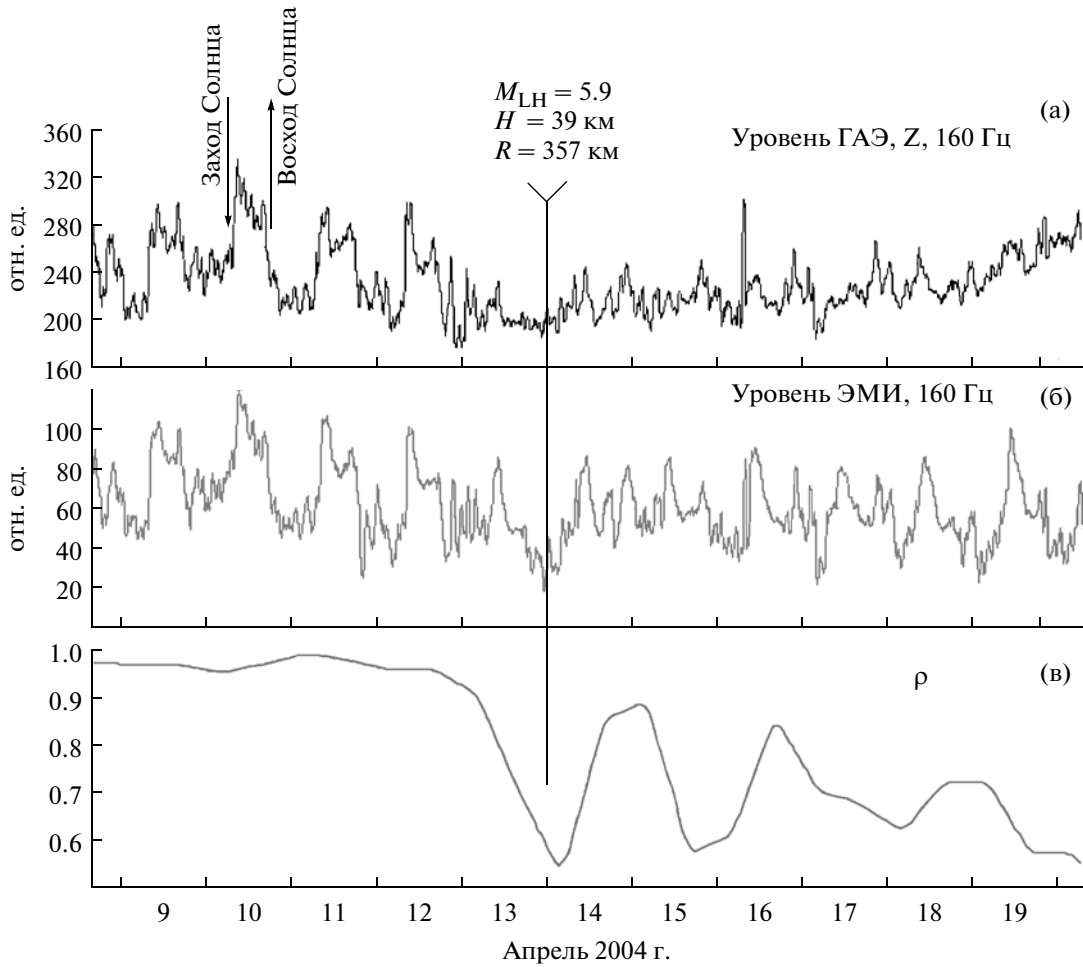


Рис. 2. Пример результатов совместных геоакустических и электромагнитных измерений: (а) – уровень ГАЭ при частоте фильтра 160 Гц (Z компонента); (б) – уровень ЭМИ при частоте фильтра 160 Гц; (в) – изменения коэффициента корреляции ρ , M_{LH} – магнитуда землетрясения, H – глубина очага, R – эпицентрального расстояния. Время UT (–11 час в сравнении с местным временем).

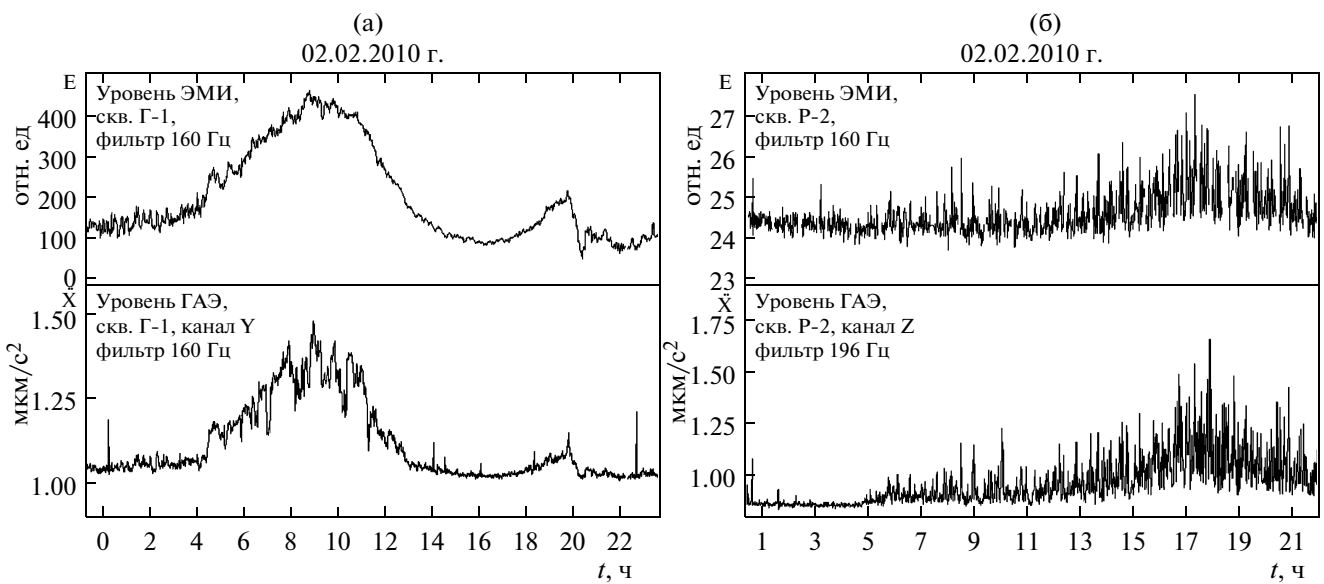


Рис. 3. Типичные формы суточных вариаций уровней ЭМИ и ГАЭ на скважинах Г-1 и Р-2. Время UT (–11 час в сравнении с местным временем). Пояснения в тексте.

антенна, основным элементом которой являлась обсадная труба скважины.

Данные, приводимые на рис. 3, позволяют отметить высокую степень корреляции между зарегистрированными на скважине вариациями уровня ЭМИ и соответствующими этой же скважине вариациями уровня ГАЭ. Коэффициенты корреляции r для рядов ЭМИ и ГАЭ скважин Г-1 и Р-2 имеют значения соответственно 0.96 и 0.81. Весьма важным результатом является также близость значений амплитуд суточных вариаций уровней ГАЭ, зарегистрированных на скважинах Г-1 и Р-2. При этом необходимо подчеркнуть, что суточные вариации уровня ГАЭ коррелируют с вариациями уровня ЭМИ, соответствующими той же скважине. Как видно из представленных данных, графики суточных вариаций ЭМИ для скважин Г-1 и Р-2 существенно различны, что объясняется различием электромагнитных обстановок в районах скважин. На электромагнитную обстановку в районе скважины Г-1, находящейся в черте г. Петропавловска-Камчатского, значительное влияние оказывают помехи техногенного происхождения, прежде всего, блуждающие токи промышленной частоты, в то время как в месте расположения скважины Р-2 регистрируется, в основном, ЭМИ естественного происхождения (ЕЭМИ).

Для исследования физических причин суточных вариаций уровня ГАЭ были привлечены результаты специальных экспериментов на образцах горных пород по изучению акустоэмиссионных откликов на электромагнитное воздействие. Сопоставление результатов таких экспериментов с данными натуральных геоакустических и электромагнитных измерений на качественном уровне говорит в пользу гипотезы о модулирующем воздействии ЕЭМИ на уровень ГАЭ для реальной геосреды. Однако при этом нельзя не учитывать, что напряженность электрической составляющей ЕЭМИ значительно меньше напряженности электрического поля, воздействующего на образцы при проведении лабораторных экспериментов. Согласно данным литературных источников, наибольшие значения уровня электрической составляющей ЕЭМИ во всем сверхнизкочастотном (СНЧ) диапазоне (30–1000 Гц) на поверхности Земли можно оценить величинами порядка 0.45–1.0 мВ/м [Ремизов, 1985]. Затухания электрической составляющей ЕЭМЗ, рассчитанные согласно [Альперт и др., 1953] для условий средневлажной земли и частоты 160 Гц, составят для глубин 250 м и 1000 м значения соответственно 0.34–0.8 мВ/м и 0.16–0.36 мВ/м, что на пять–шесть порядков ниже напряженности электрического поля, воздействующего на образцы при проведении лабораторных экспериментов. Также возникает ряд вопросов, относящихся к особенностям геоакустических откликов реальной геосреды на воздействие ЭМИ СНЧ диапазона: наличие задержек откликов, связь формы отклика с изменением

состояния геосреды. Эти и другие вопросы, относящиеся к реакции горных пород на воздействие электромагнитного излучения в условиях их естественного залегания и при лабораторных экспериментах, определяли основное содержание данной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ОБРАЗЦАМИ ГОРНЫХ ПОРОД

В первых экспериментах по исследованию электромагнитного воздействия на образцы горных пород использовались образцы, содержащие “пьезоэлектрические” (кварцевый песок) и “непьезоэлектрические” (песок из диабазы) добавки к цементу [Соболев, Пономарев, 2003]. Электромагнитное воздействие осуществлялось двуполярными прямоугольными импульсами с частотой 250 Гц и 2.5 кГц с амплитудами 20 В. По результатам серии таких экспериментов была установлена тенденция увеличения (порядка 1%) уровня акустоэмиссионной активности при электромагнитном воздействии на нагруженные образцы. Значительный объем экспериментов с образцами горных пород был проведен в 2002–2008 г. Научной станцией РАН в г. Бишкеке (НС РАН). Образцы подвергались одноосному сжатию с помощью пружинной реологической установки УДИ с максимальной сжимающей нагрузкой 100 т [Ставрогин, Протосеня, 1985] и реологического стенда с длинноходовой пружиной, обеспечивающего усилие сжатия до 20 т. Электромагнитное воздействие на образцы осуществлялось через электроды, прижатые к боковым граням образца. В экспериментах, результаты которых представлены ниже, в качестве источников электромагнитного воздействия использовались измерительные генераторы Г5-54 и Г6-28. В ходе экспериментов для различных образцов горных пород при различных величинах нагрузок оценивались соответствующие пороговые значения напряженности электрического поля, при которых начинает наблюдаться отклик на электромагнитное воздействие.

Типичные примеры результатов таких экспериментов (рис. 4–рис. 6), показывают, что следствием электромагнитного воздействия является заметное повышение акустоэмиссионной активности образцов. Такой эффект на качественном уровне аналогичен эффекту повышения уровня ГАЭ в темное время суток вследствие увеличения в это время напряженности сверхнизкочастотного электрического поля.

Особенности откликов на электромагнитные воздействия по результатам лабораторных экспериментов. По результатам ранее проведенных экспериментов [Аладьев и др., 2003; Закупин и др., 2003; Bogomolov et al., 2004; Гаврилов, Богомолов, 2008; Гаврилов и др., 2008] можно сделать вывод, что пороговая величина электромагнитного воздействия,

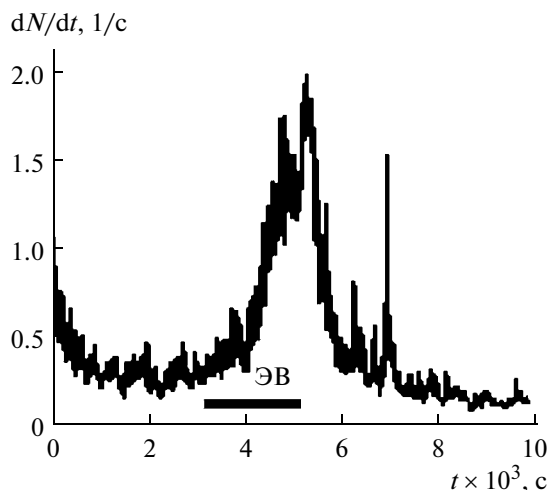


Рис. 4. Отклик акустоэмиссионной активности образца габбро. N – число импульсов АЭ. Сжимающее усилие – 95% от разрушающего воздействия. Напряженность электрического поля $E = 400$ В/м, частота следования импульсов – 2.5 кГц, длительность – 20 мкс. Интервал воздействия электрическими импульсами (ЭВ) отмечен темной полосой.

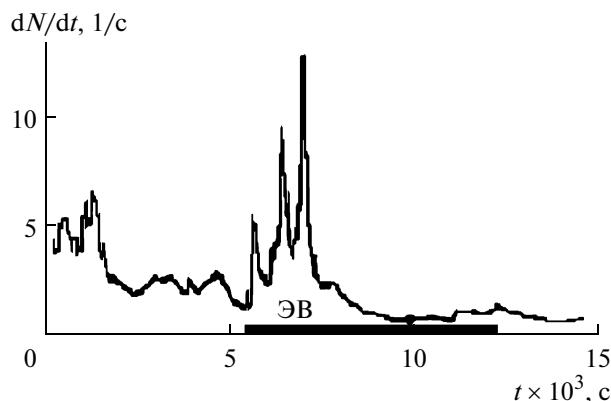


Рис. 5. Отклик акустоэмиссионной активности образца кварцита. N – число импульсов АЭ. Сжимающее усилие – 95% от разрушающего воздействия. Напряженность электрического поля $E = 400$ В/м. Частота следования импульсов – 2.5 кГц, длительность – 20 мкс. Интервал воздействия электрическими импульсами (ЭВ) отмечен темной полосой.

при которой наблюдается акустоэмиссионный отклик, определяется следующими тремя группами параметров:

- петрофизическими характеристиками образца: наличием пьезоэлектрических фракций и макронеднородностей, степенью водонасыщенности;
- относительным уровнем механической нагрузки на образец;

– параметрами электромагнитного воздействия: частотой следования импульсов, их полярностью (одно- или биполярные) и крутизной фронтов.

В табл. 1 представлены результаты некоторых экспериментов [Гаврилов, Богомолов, 2008; Гаврилов и др., 2008], позволяющие оценить роль перечисленных групп параметров на пороговое значение электромагнитного воздействия. Искусственное водонасыщение образцов позволяло снизить пороговое значение электромагнитного воздействия более чем в два раза. Так для обычных, “сухих” образцов

Таблица 1.

Образец	Относительная нагрузка (k)	Режим электромагнитного воздействия	Пороговая напряженность электромагнитного воздействия, В/м
Сухие гранитоиды	0.75–0.95	Непрерывная последовательность импульсов с частотой 1–3 кГц, длительностью 5–50 мкс	500
Водонасыщенная керамика диоксида циркония	0.75–0.95	Непрерывная последовательность импульсов с частотой 1–3 кГц, длительностью 5–50 мкс	200
Кварцит	0.15–0.95	Непрерывная последовательность импульсов с частотой 1–3 кГц, длительностью 5–50 мкс	200
Сухие гранитоиды	0.75–0.95	Серии одиночных импульсов через 10–50 с, длительность каждого ~0.5 мс	~5000
Гранит мелкозернистый	0.97	Циклическое, с продолжительностью серий 2.5–3 мин и паузами между сериями 2.5–3 мин. Внутри серии воздействие осуществлялось непрерывной последовательностью импульсов с частотой 1–3 кГц и длительностью 5–50 мкс	50–100

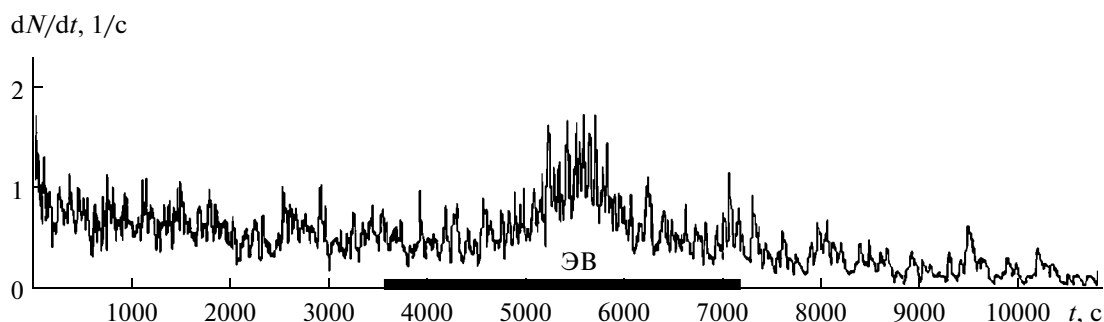


Рис. 6. Изменение акустоэмиссионной активности образца гранодиорита при воздействии электрических импульсов. N – число импульсов АЭ. Сжимающее усилие – 91% от разрушающего воздействия. Частота следования импульсов – 2.2 кГц, длительность – 20 мкс, амплитуда 35 В, генератор Г-5-54. Интервал воздействия электрическими импульсами (ЭВ) отмечен темной полосой [Закупин и др., 2007].

гранитоидов при одноосных сжимающих нагрузках в диапазоне $k = 0.75–0.95$ от максимального уровня (разрушение образца данной серии), характерная пороговая напряженность электрического поля имеет величину порядка $E \sim 500$ В/м. Для искусственно водонасыщенных образцов, изготовленных из модельного материала – керамики диоксида циркония – акустоэмиссионный отклик наблюдался при напряженности электрического поля $E \sim 200–300$ В/м, что в 3–4 раза меньше по сравнению со случаем сухих образцов гранита и каменной соли. Для образцов пьезоэлектрических материалов отклики на такое же воздействие регистрировались в весьма широком диапазоне нагрузок – от 0.15 до 0.95 от уровня разрушения.

Из результатов лабораторных экспериментов следует, что одним из важнейших параметров, определяющих степень акустоэмиссионной чувствительности образца к электромагнитному воздействию, является уровень его напряженно-деформи-

рованного состояния. При нагрузках, близких к разрушению, не требовалось значительного уровня дополнительных внешних воздействий для того, чтобы происходило стимулированное выделение части энергии через акустическую эмиссию. Так при нагрузках 0.96–0.99 от уровня разрушения в сеансах с электрическими импульсами относительно небольшой амплитуды (30 В) отмечались отчетливые акустоэмиссионные отклики обычных сухих образцов гранита и габбро, не содержащих видимых неоднородностей и повреждений.

Высокая акустоэмиссионная чувствительность образцов к электромагнитному воздействию при околоразрушающих нагрузках проявлялась также в наличии откликов на повторное воздействие. Из приводимых на рис. 7 данных видно, что при повторном электромагнитном воздействии на образец имеет место прирост уровня акустической эмиссии, хотя и существенно меньшей амплитуды, чем при первом воздействии. Между тем, для диапазона сжимающих нагрузок $0.7 < k < 0.95$, согласно [Закупин и др., 2003; Vogomolov et al., 2004] в таких случаях было характерно либо полное пропадание откликов на повторные электромагнитные воздействия, либо их ослабление до уровня флуктуаций. Наименьшие значения пороговой напряженности электрического поля, полученные по результатам экспериментов, составили 50–100 В/м (табл. 1).

Из результатов экспериментов на образцах горных пород [Закупин, 2006] следует, что практически всегда акустоэмиссионный отклик достигает своих максимальных значений с достаточно большой задержкой по отношению к началу электромагнитного воздействия. При этом по результатам лабораторных экспериментов можно выделить следующие основные факторы, от которых зависит величина задержки акустоэмиссионных откликов на электромагнитное воздействие:

– степень трещиноватости образца, наличие в образце макро- и микронеоднородностей;

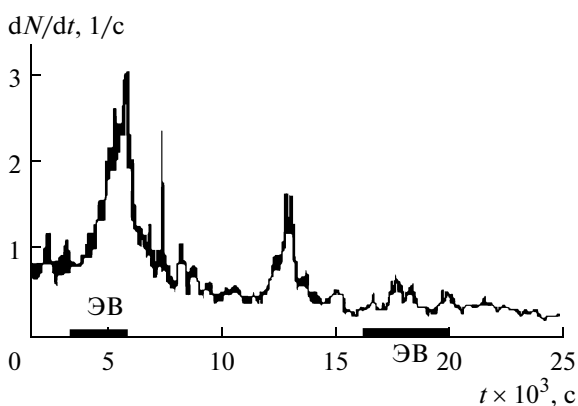


Рис. 7. Пример акустоэмиссионных откликов образца габбро, находящегося при околоразрушающей нагрузке ($k = 0.97$). Частота следования импульсов – 2.0 кГц, длительность 20 мкс, $E = 400$ В/м. Интервалы воздействия электрическими импульсами (ЭВ) отмечены темной полосой.

– наличие в образце пьезоэлектрических фракций;

– уровень сжимающих напряжений.

Для монолитных образцов наиболее характерными оказались задержки порядка 15–40 минут [Закупин и др., 2006]. На трещиноватых образцах наблюдались короткие задержки порядка 100 с. Наиболее короткие задержки наблюдались при сочетании в образце пьезоэлектрических фракций (образец кварцита) с изначальными макротрещинами. По результатам экспериментов была выявлена статистически значимая тенденция уменьшения величины задержки с увеличением величин сжимающих напряжений (несмотря на довольно значительный разброс задержек даже для одной и той же серии образцов при одной и той же нагрузке).

РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ИСКУССТВЕННЫМ ИСТОЧНИКОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

В 2008–2010 гг. на территории Бишкекского геодинамического полигона авторами были организованы специальные эксперименты, в рамках которых осуществлялась регистрация геоакустических откликов горных пород в естественных условиях на воздействие электрических импульсов, вырабатываемых электрогенераторной установкой ЭРГУ-600-2. Одна из основных целей указанных экспериментов состояла в оценке пороговых значений напряженности электрического поля, требуемой для получения геоакустических откликов горных пород в условиях их естественного залегания, в том числе для условий скважинных измерений.

Электрогенераторная установка ЭРГУ-600-2 штатно используется для режимного глубинного электрзондирования земной коры территории Бишкекского геодинамического полигона [Волыхин и др., 1993]. Нагрузкой установки является диполь-излучатель, расположенный в центральной части полигона, ориентированный в направлении север–юг. Диполь выполнен в виде закопанного на глубине 1 м изолированного алюминиевого кабеля общим сечением 1200 мм². Расстояние между полюсами АВ = 4028 м. Конструктивно каждый полюс диполя представляет собой распределенный электрод-заземлитель с размерами токовода 130 × 130 м. Заземления расположены в глинистых грунтах с удельным электрическим сопротивлением для поверхностного слоя горных пород в районе диполя-излучателя $\rho = 10$ Ом м при мощностях слоев 100 м по месту одного полюса и 70 м – по месту другого. Заземляющие решетки изготовлены из металлических стержней диаметром 20 мм с шагом 6 м. Через каждые 12 м к решетке приварены вертикальные электроды длиной 2 м. Вся система уложена на глубине 2 м. Суммарное электрическое

сопротивление диполя составляет 0.5 Ом, индуктивность – 9.8 мГн. Зондирующий импульс ЭРГУ-600-2 представляет собой серию периодических знакопеременных импульсов тока прямоугольной формы с амплитудой 600–800 А и периодом 10 с. Характерное время нарастания тока в диполе около 0.2 с, спада – менее 0.05 с. Длительность сеанса составляет 14 минут. Ежедневно, кроме выходных и праздничных дней, проводится шесть таких сеансов.

Первый натурный эксперимент на территории Бишкекского геодинамического полигона с использованием установки ЭРГУ-600-2 проводился в июне 2008 г. Во время эксперимента геофон был установлен на расстоянии $r = 65$ м от центра южного заземлителя в неглубокой яме на стальной трубе, вбитой в слой плотной глины. Для измерений в эксперименте использовался комплект аппаратуры, аналогичный применяемый для скважинных геоакустических измерений на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне (рис. 1) с использованием пьезокерамического сейсмоприемника типа А1612. Полученные в ходе этого эксперимента результаты (рис. 8), показывают, что уверенные отклики ГАЭ на электромагнитное воздействие отмечались для диапазонов частот 160, 560 и 1200 Гц. Своих максимальных значений отклики ГАЭ достигали примерно через 26 минут.

Исходя из известных соотношений [Колесников, 2007], при значении $\rho = 10$ Ом м для поверхностного слоя горных пород в районе диполя-излучателя напряженность электрического поля, создаваемого электрогенераторной установкой в месте расположения геофона можно приблизительно оценить величиной $E = 0.2–0.3$ В/м. Если учесть, что согласно рис. 8, отклики ГАЭ на электромагнитное воздействие на частоте 160 Гц превышают уровень фоновых сейсмических шумов примерно в 12 раз, то, задаваясь минимальным соотношением сигнал/шум равным трем, пороговый уровень электромагнитного воздействия в данном случае можно оценить величиной порядка 5×10^{-2} В/м.

В 2009–2010 гг. ИС РАН в рамках проектов РФФИ № 09-05-12059-офи_м, № 10-05-00231-а была проведена серия экспериментов с регистрацией откликов ГАЭ на сеансы ЭРГУ-600-2 геофонами, расположенными в неглубоких скважинах. По данным измерений оценивались значения напряженности электрического поля, при которых начинали обнаруживаться отклики ГАЭ в сеансах электромагнитного зондирования коры импульсами тока источника ЭРГУ-600-2. Указанные эксперименты проводились сотрудниками лаборатории ЛМЭС ИС РАН под руководством канд. физ.-мат. наук А.С. Закупина. Основной объем измерений был выполнен на скважинах № 1156 и № 6623. Скважина № 1156, расположенная в районе поселка Горная Маевка, имеет глубину 330 м, обсажена на всю глубину, уро-

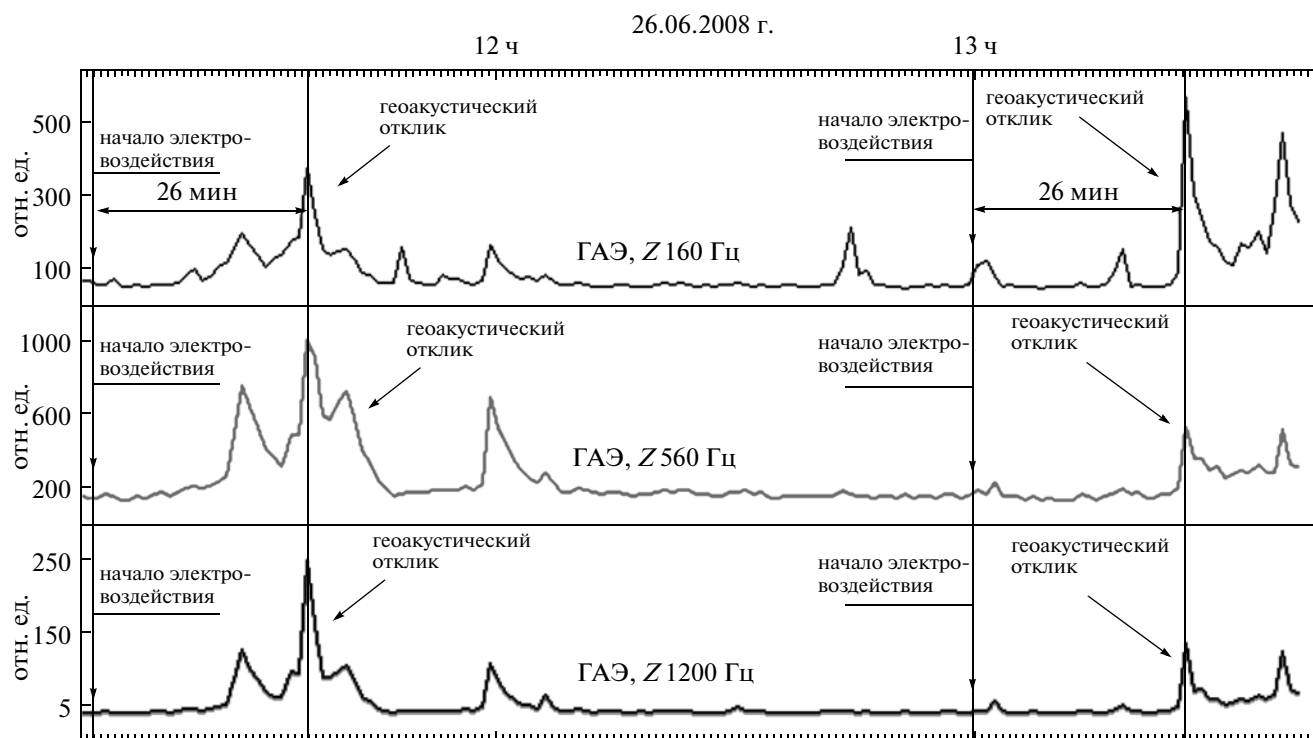


Рис. 8. Результаты регистрации откликов ГАЭ на сеансы ЭРГУ-600-2, регистрация на поверхности. Пояснения в тексте.

вень воды находится на глубине 87 м. Для измерений геофон был установлен на глубине 120 м. Расстояние скважины до северного заземлителя диполя составило 5.54 км, до южного — 5.65 км. Скважина № 6623, расположенная в районе поселка Арашан, имеет глубину 125 м, обсажена на всю глубину, уровень воды находится на глубине 67 метров. Для измерений геофон был установлен на глубине 90 м. Расстояние скважины до северного заземлителя составило 6.77 км, до южного — 9.63 км. На обеих скважинах для геоакустических измерений использовались трехкомпонентные геофоны с пьезокерамическими датчиками типа А1638 производства ЗАО “Геоакустика”. Металлический корпус геофона прижимался к внутренней стенке обсадной трубы скважины рессорой. Сигналы на выходах каждого из датчиков геофона после усиления поступали на регистрацию в четырех частотных полосах: регистрировался широкополосный сигнал в полосе 0–400 Гц, также сигналы после полосовой фильтрации в трех частотных полосах с центральными частотами 40, 160 и 320 Гц. Фильтрация осуществлялась активными высокочастотными ($Q = 15$) полосовыми фильтрами Баттерворта четвертого порядка. Затем осуществлялась цифровая обработка и регистрация сигналов с применением модулей Zet210.

По результатам расчетов значения напряженности электрического поля, создаваемого установкой ЭРГУ-600-2 в районе скважины № 1156 (п. Горная Маевка), составили: для тангенциальной составля-

ющей $E_{\theta} = 0.04$ мВ/м; для радиальной составляющей $E_r = 0.01$ мВ/м.

Для района скважины № 6623 (п. Арашан): $E_{\theta} = 0.005$ мВ/м; $E_r = 0.005$ мВ/м.

Значения E_{θ} и E_r рассчитывались по формулам, приводимым в [Колесников, 2007]:

$$E_{\theta} = \frac{IpL \sin \theta}{2\pi r^3}, \text{ где } r - \text{расстояние между пунктом}$$

измерения и центром диполя; θ — угол между осью диполя и направлением r ; L — расстояние между полюсами диполя.

$$E_r = \frac{IpL \cos \theta}{2\pi r^3}.$$

Таким образом, расчетные значения напряженности электрического поля, создаваемого установкой ЭРГУ-600-2 для района скважины № 1156, оказались более чем на порядок ниже значений напряженности электрического поля ЕЭМИ, оказывающего модулирующее воздействие на уровень ГАЭ горных пород в районе скважины Р-2 на Камчатке. Для района скважины № 6623 соответствующие значения напряженности электрического поля оказались примерно на два порядка ниже.

В ходе непрерывных измерений в августе–сентябре 2010 г. отклики ГАЭ на сеансы ЭРГУ-600-2 надежно регистрировались на всех измерительных каналах аппаратуры скважины № 1156 (рис. 9).

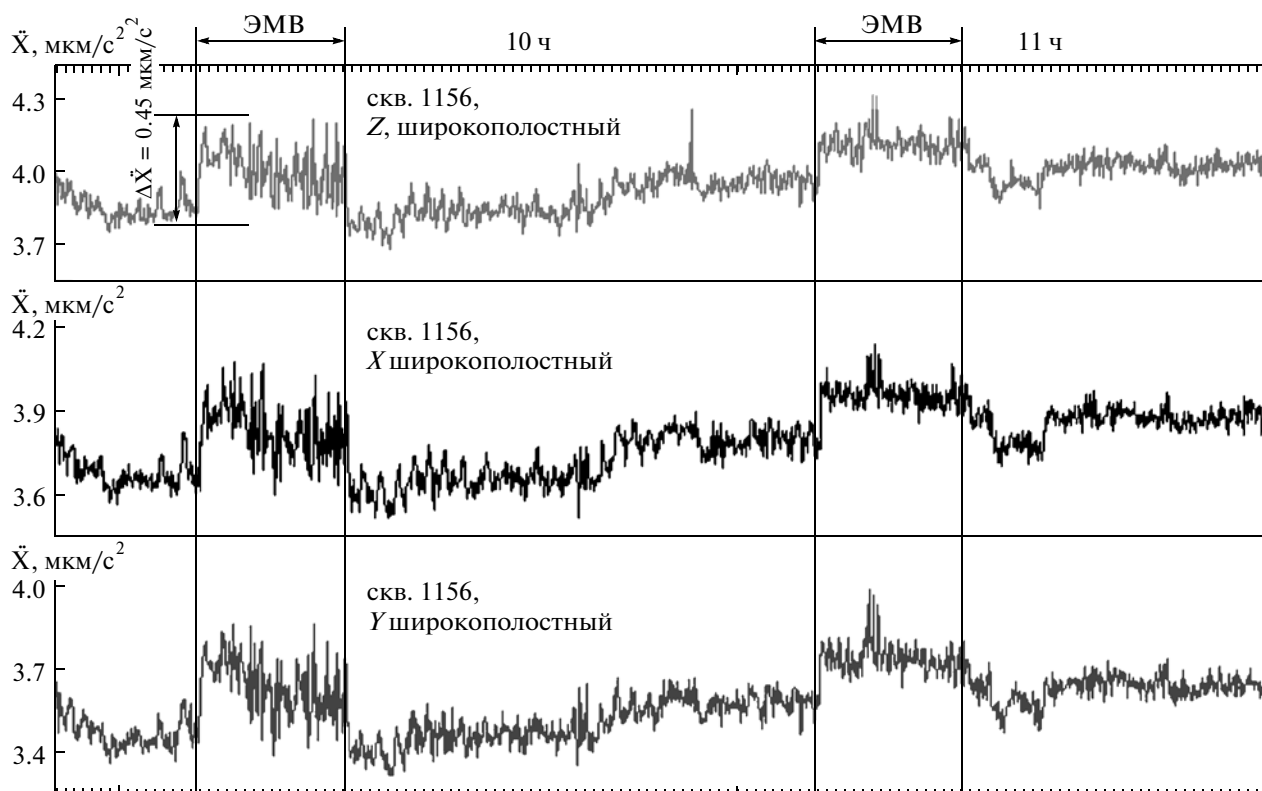


Рис. 9. Примеры записей откликов ГЭ на сеансы ЭРГУ-600-2 на скважине № 1156. Пояснения в тексте.

СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ СКВАЖИННЫХ ГЕОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Пороговые уровни электромагнитного воздействия. При сравнении данных натуральных экспериментов с искусственным источником электромагнитного воздействия на скважине №1156 (рис. 9) с данными, полученными при регистрации откликов ГЭ на воздействие ЕЭМИ на скважине Р-2 (рис. 3), обращает на себя внимание близкие значения полученных при этом амплитуд откликов (0.36–0.45 мкм/с²). Напомним, что расчетные значения напряженности воздействующего ЭМИ естественного происхождения для скважины Р-2 примерно на порядок выше значений напряженности электрического поля, создаваемого установкой ЭРГУ-600-2 в районе скважины № 1156. Указанные результаты на количественном уровне подтверждают выдвинутую ранее гипотезу [Гаврилов и др., 2006; Гаврилов, 2007] о модулирующем воздействии ЕЭМИ на уровень геоакустической эмиссии горных пород в условиях их естественного залегания. Это является одним из наиболее важных результатов, полученных в ходе проведенных исследований.

Особенности суточных вариаций уровня ГЭ как откликов на воздействие ЭМИ. Как следует из результатов долговременных скважинных геоакусти-

ческих измерений характер суточных вариаций уровня ГЭ может значительно меняться во времени при сохранении параметров воздействующего ЭМИ. В качестве примера можно указать на данные, приводимые на рис. 2, показывающие, что перед сильными близкими землетрясениями отклики ГЭ на воздействие ЭМИ могут деградировать вплоть до полного исчезновения. В качестве дополнительного примера ниже представлены записи уровня ГЭ, полученные на глубине 200 м в скважине Г-1 одним и тем же геофоном, но в разное время (рис. 10). Сопоставление этих результатов с данными экспериментов на образцах горных пород показывает, что они в значительной степени соответствуют типичным результатам лабораторных экспериментов (рис. 4–7). По результатам таких экспериментов в подавляющем большинстве случаев спад акустоэмиссионного отклика начинается значительно раньше окончания электромагнитного воздействия. Кроме этого, при повторных воздействиях на образцы характерно либо полное пропадание отклика, либо его деградация до уровня флуктуаций [Закупин и др., 2003; Bogomolov et al., 2004]. Не детализируя возможный физический механизм указанных эффектов, такие ослабленные отклики можно считать проявлением дефицита дефектов структуры горных пород на различных масштабных уровнях.

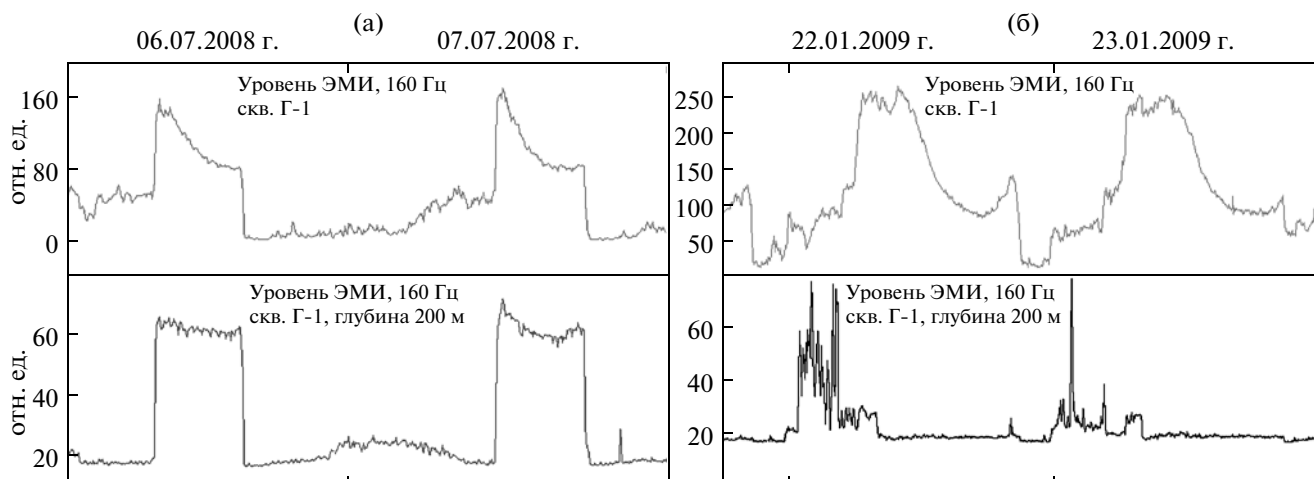


Рис. 10. Примеры изменений во времени характера откликов ГАЭ на воздействие ЭМИ. Скважина Г-1, глубина 200 м. Время UT (–11 час в сравнении с местным временем).

Для понимания конкретного физического механизма суточного хода уровня ГАЭ и причин его нарушений необходимо обратить внимание на высокую степень повторяемости формы суточных вариаций уровня ГАЭ в сейсмически спокойные периоды. Считая, что физические причины суточного хода ГАЭ связаны с модулирующим воздействием ЭМИ, можно сделать вывод, что стабильность суточных вариаций ГАЭ может быть обеспечена лишь при условии стабильности в такие периоды основных источников ГАЭ и стабильности электродинамических условий. В естественных условиях стабильные долговременные источники ГАЭ могут быть связаны, прежде всего, с трением контактирующих поверхностей зерен, блоков среды и бортов старых трещин в процессе переупаковки среды. Такие

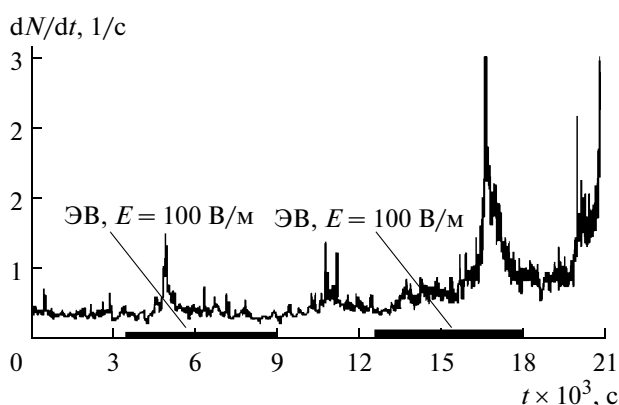


Рис. 11. Пример акустоэмиссионного отклика образца мелкозернистого гранита при нагрузке $k = 0.9$. N – число импульсов АЭ. Частота следования импульсов – 2.0 кГц, длительность 20 мкс, $E = 100$ В/м (первый сеанс), $E = 300$ В/м (второй сеанс). Интервалы воздействия электрическими импульсами (ЭВ) отмечены темной полосой. Пояснения в тексте.

процессы, как известно, сопровождаются как геоакустической эмиссией, так и образованием на контактирующих поверхностях горных пород двойных электрических слоев (ДЭС). Появление и увеличение зарядов ДЭС тормозит процессы переупаковки из-за увеличения коэффициента трения, что выражается в уменьшении уровня ГАЭ. Соответственно для стимуляции геоакустических процессов требуется уменьшение величин зарядов ДЭС, что происходит при увеличении напряженности ЭМИ, вызывающим появление индуцированных в среде электрических токов, взаимодействующих с зарядами ДЭС. Такой физический механизм объясняет эффект суточного хода уровня ГАЭ с ночным максимумом как следствие модуляции электромагнитным СНЧ излучением. Ослабленные отклики уровня ГАЭ, подобные приводимым на рис. 2 и рис. 10, в этом случае могут быть объяснены нарушением в зоне регистрации ГАЭ имевшихся ранее электродинамических условий, например, появлением новых источников ЭМИ литосферного происхождения.

Сравнивая данные геоакустических и электромагнитных измерений на скважинах Г-1 и Р-2 (рис. 3), нельзя не отметить, что отклик ГАЭ для скважины Г-1 имеет значительно меньшую дисперсию в сравнении с откликом для скважины Р-2. Такой результат объясняется, прежде всего, существенной разницей в амплитудах суточных вариаций ЭМИ для скважин Г-1 и Р-2 – около 300% к дневному уровню для скважины Г-1 и около 8% для скважины Р-2. Указанный результат соответствует данным эксперимента, проведенного ИС РАН с образцом гранита (рис. 11), в рамках которого было осуществлено два сеанса длительностью по 1.5 час с периодическим электровоздействием прямоугольными импульсами каждые 2.5–3 мин. При этом напряженность воздействующего электрического поля в сеансах различалась в три раза. Как видно из

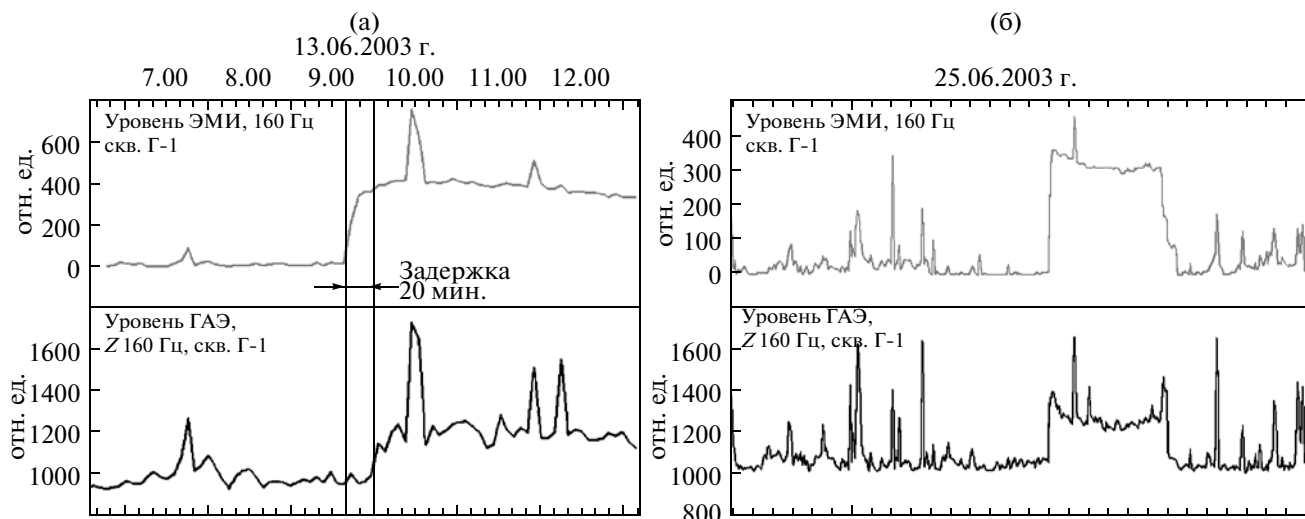


Рис. 12. Сравнение временных рядов ГАЭ и ЭМИ на скважине Г-1: (а) – наличие задержки на интервале восстановления суточного хода ГАЭ; (б) – отсутствие задержки на интервале стабильного суточного хода ГАЭ. Время UT (–11 час в сравнении с местным временем).

представленных данных, акустоэмиссионная активность нагруженных образцов при этом оказалась прямо связанной с напряженностью воздействующего электрического поля. Такой результат, во-первых, соответствует данным скважинных геоакустических измерений о модулирующем эффекте воздействия ЭМИ. Во-вторых, из результатов, представленных на рис. 11, следует, что увеличение напряженности ЭМИ приводит к увеличению средней величины уровня ГАЭ и соответственно к уменьшению дисперсии.

Задержки откликов ГАЭ на воздействие ЭМИ. В ходе исследования вопроса с задержками применительно к ГАЭ было установлено, что на интервалах устойчивого суточного хода ГАЭ на скважине Г-1 задержка между передними фронтами суточных вариаций уровней ЭМИ и ГАЭ (откликом геосреды) отсутствует (рис. 12б). При детальных исследованиях удалось установить, что такие задержки на скважине Г-1 имеют место на интервалах восстановления суточного хода ГАЭ после его деградации. На этих интервалах длительностью порядка 14 суток с начала появления откликов ГАЭ наблюдались задержки от 20 до 27 мин (рис. 12а).

Необходимо отметить, что при проведении натурных экспериментов с размещением геофонов в скважинах задержки откликов ГАЭ на воздействие импульсов ЭРГУ-600-2 не были зарегистрированы (рис. 9), в то время как по данным геоакустических измерений на поверхности задержки на такое же воздействие составляли порядка 26 мин (рис. 8). Наиболее очевидной возможной причиной таких результатов является значительная разница в уровне помех на поверхности и в скважине на глубинах в первые сотни метров и более. Так, согласно данным, приводимым в [Гаврилов и др., 2006], наиболее рез-

кое снижение уровня шумов экзогенного происхождения для скважины Г-1 наблюдалось до глубины 200 м (примерно на порядок по сравнению с уровнем шумов на поверхности). Очевидно, что в условиях лабораторных экспериментов и при геоакустических измерениях на поверхности невозможно обеспечить такой же низкий уровень внешних шумов, как в скважине на глубинах в сотни метров. Соответственно, в таких случаях невозможно выделить из помех сигналы отклика столь же низкого уровня, как в случае скважинных измерений. Исходя из указанных результатов, можно предположить, что и на начальной стадии электромагнитного воздействия отклики ГАЭ могут иметь место, однако их уровень может не превышать уровня внешних помех и собственных шумов измерительного тракта и такой результат может трактоваться как наличие задержки откликов ГАЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставление данных скважинных геоакустических и электромагнитных измерений, проводимых на Камчатке, с материалами лабораторных экспериментов показало сходство реакций естественной геосреды и образцов горных пород на внешнее электромагнитное воздействие. Такой результат представляется вполне закономерным, поскольку как для горных пород в условиях их естественного залегания, так и для образцов горных пород характерны гетерогенность, наличие дефектных структур, а также определенная степень водонасыщенности, обуславливающих, судя по полученным данным, чувствительность к внешнему электромагнитному воздействию.

Результаты, полученные при проведении измерений на Бишкекском геодинамическом полигоне с использованием источника электромагнитного воздействия ЭРГУ-600-2, показывают, что отклики ГАЭ горных пород в условиях их естественного залегания в случае размещения геофонов в скважинах могут надежно регистрироваться уже при уровне напряженности воздействующего электрического поля порядка 0.5 мВ/м. Это является важным экспериментальным подтверждением выдвинутой ранее в [Гаврилов и др., 2006] гипотезы о модуляции уровня ГАЭ горных пород в условиях их естественного залегания естественным электромагнитным полем СНЧ диапазона.

Авторы признательны Г.А.Соболеву за ценные конструктивные замечания.

Работы выполнены в рамках проектов РФФИ 09-05-98543-р_восток-а, 09-05-12059-офи_м, 10-05-00231-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аладьев А.В., Богомолов Л.М., Боровский Б.В., Закупин А.С. и др.* Закономерности акустической эмиссии образцов геоматериалов, испытываемых на ползучесть, при энерговоздействиях физическими полями. Проблемы сейсмологии 3-его тысячелетия. Новосибирск: изд-во СО РАН. 2003. С. 168–172.
- Альперт Я.Л., Гинзбург В.Л., Фейнберг Е.Л.* Распространение радиоволн. М.: Гостехиздат. 1953. 220 с.
- Беляков А.С.* Магнитоупругие акустические геофоны для геофизических исследований // Сейсмические приборы. Вып. 33. М.: ОИФЗ РАН. 2000. С. 27–45.
- 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.* Физические причины суточных вариаций уровня геоакустической эмиссии // Докл. РАН. 2007. Т. 414. № 3. С. 389–392.
- Гаврилов В.А., Богомолов Л.М.* К вопросу о влиянии электромагнитных полей естественного происхождения на уровень геоакустической эмиссии. Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России. Труды региональной научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский, 11–17 ноября 2007 г. Т. 1. Петропавловск-Камчатский. 2008. С. 59–63.
- Гаврилов В.А., Богомолов Л.М., Закупина Г.С.* Эффект модуляции уровня геоакустической эмиссии с естественным электромагнитным полем – сопоставление с результатами экспериментов. Сборник трудов XX сессии Российского акустического общества. Т. 1. М.: ГЕОС. 2008. С. 299–302.
- Закупин А.С., Аладьев А.В., Богомолов Л.М. и др.* Влияние внешнего электромагнитного поля на активность акустической эмиссии нагруженных геоматериалов. Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов / Под ред. Ю.Г. Леонова и С.В. Гольдина. Москва–Бишкек. 2003. С. 304–324.
- Закупин А.С.* Исследование электростимулированных вариаций акустической эмиссии при деформировании образцов геоматериалов. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ИФЗ РАН. 2006. 21 с.
- Закупин А.С., Авагимов А.А., Богомолов Л.М.* Отклики акустической эмиссии геоматериалов на воздействие электроимпульсов при различных величинах сжимающего напряжения // Физика Земли. 2006. № 10. С. 43–50.
- Колесников В.П.* Основы интерпретации электрических зондирований. М.: Научный мир. 2007. 248 с.
- Николаев А.В., Беляков А.С., Лавров В.С., Жигалин А.Д.* Геоакустический контроль как средство изучения состояния литосферы и прогноза землетрясений // Акустический Журн. 2005. Т. 51. Приложение. С. 140–149.
- Ремизов Л.Т.* Естественные радиопомехи. М.: Наука. 1985. 198 с.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с.
- Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г.* Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. М.: Недра. 1985. 271 с.
- 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.