АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2020, том 66, № 1, с. 58–70

АКУСТИКА СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ ТВЕРДЫХ СРЕД. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

УДК 550.34.016;537.868;534-18

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОТКЛИКА ГОРНЫХ ПОРОД НА ВИБРОВОЗДЕЙСТВИЕ В УСЛОВИЯХ СЛАБОГО НЕРАВНОМЕРНОГО ФЛЮИДОНАСЫЩЕНИЯ

© 2020 г. И. Я. Чеботарева[a], *, А. Н. Камшилин[b]

[a] *Институт проблем нефти и газа РАН, ул. Губкина 3, Москва, 119333 Россия*

[b] *Институт физики Земли РАН, ул. Большая Грузинская 10/1, Москва, 123995 Россия*

**e-mail: irinache@inbox.ru*

Поступила в редакцию 24.04.2019 г.
После доработки 26.08.2019 г.
Принята к публикации 05.09.2019 г.

Исследованы особенности электрического отклика горных пород на вибровоздействие в диапазоне частот 0.7–10 кГц при слабом неоднородном насыщении кернов песчаника Berea полярной и неполярной жидкостью. Жидкость в образцы добавлялась с помощью пипетки через прокол защитной пленки. При этом создавалась сильная латеральная неоднородность насыщения у бокового края цилиндрического керна. При насыщении использовался керосин (как неполярная жидкость) и солевые водные растворы (как полярная жидкость) в объеме около 6% от объема порового пространства. Результаты физического моделирования показали, что электрический отклик содержит интенсивные вторые гармоники, амплитуда которых на низких частотах сравнима с амплитудой первых гармоник. При добавлении 0.5%-го раствора NaCl существенное изменение электрического отклика по сравнению с откликом керна в исходном состоянии наблюдалось только в диапазоне частот 5.45–7.15 кГц. При добавлении в керн керосина и 0.05%-го раствора соли наблюдается одинаково сильное увеличение электрического отклика на всех частотах, однако характер изменения спектра и его временная динамика для полярной и неполярной жидкостей существенно различается. Представленные результаты физического моделирования будут полезны для понимания сейсмоэлектрических процессов в гетерогенном, структурно неоднородном природном массиве, а также могут послужить базой для развития новых дистанционных технологий определения типа флюидонасыщения горных пород.

Ключевые слова: сейсмоэлектрический эффект 2-го рода, горные породы, электрокинетические явления, гетерогенные среды

DOI: 10.31857/S0320791920010037

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что деформация и разрушение горных пород сопровождается появлением электромагнитных сигналов. Возмущение электромагнитного поля регистрируется в зонах подготовки землетрясений, при проведении взрывов, при горных ударах и оползнях. Существует много механизмов, объясняющих связь деформационных и электромагнитных возмущений в различных средах. Это, например, пьезоэлектрический и пьезомагнитный эффекты, пироэлектрический эффект, бароэлектрический эффект, электрокинетический эффект. В работе [1] приведен перечень других механоэлектромагнитных эффектов в горных породах с большим числом ссылок. Однако, при интерпретации связи акустических и электрических явлений во флюидизированных пористых горных породах, которые не содержат высокоомных включений, предпочтение обычно отдается сейсмоэлектрическому эффекту 2-го рода. Он имеет электрокинетическую природу и заключается в возникновении переменной разности потенциалов в точках, расположенных в направлении распространения упругой волны. Вторая часть названия связана с тем, что ко времени открытия этого явления был уже известен другой сейсмоэлектрический эффект [2, 3], который заключается в изменении силы электрического тока через горные породы при возбуждении в них упругих колебаний.

Сейсмоэлектрический эффект 2-го рода был открыт А.Г. Ивановым при регистрации сигналов от слабых приповерхностных взрывов. Им же было экспериментально доказано, что обнаруженный феномен “по своим проявлениям и возможностям использования отличается от упомянутого выше сейсмического эффекта с током” и что

“изучаемый эффект Е проявляется в объеме горных пород, а не на границе раздела электрод–земля” [3, 4]. А.Г. Иванов высказал предположение, что эффект связан с комплексом электрокинетических явлений в сложной двухфазной системе жидкость–твердый скелет, с деформированием и относительным смещением двойного электрического слоя на границе двух фаз. Адсорбционная часть двойного слоя, примыкающая к твердой фазе, неподвижна относительно нее. Диффузная же часть двойного слоя, состоящая из менее прочно связанных противоионов, наоборот, подвижна и легко смещается относительно поверхности при механическом воздействии. Это приводит к возникновению разности потенциалов. Помимо прямого сейсмоэлектрического эффекта 2-го рода существует и обратный сейсмоэлектрический эффект, когда при воздействии переменного электрического поля на увлажненную породу генерируются акустические колебания.

Первое теоретическое описание эффекта было сделано Я.И. Френкелем [5]. Он впервые вывел уравнения распространения продольных и поперечных волн в двухфазной среде и определил вид функциональной зависимости между амплитудами электрического отклика и акустического воздействия. Спустя 12 лет появились известные уравнения Био, описывающие распространение упругих волн в пористой влаго- и газонасыщенной среде [6]. Как пишет С. Прайд [7], практически идентичные уравнения могли бы быть получены и самим Я.И. Френкелем, если бы он не сделал двух небольших ошибок, однако существование быстрой и медленной моды продольных волн следует уже из уравнений Френкеля. С. Прайд существенно развил и обобщил сейсмоэлектрическую теорию. Он критически проанализировал имеющиеся разработки, сделал ряд упрощающих предположений и выписал более общую самосогласованную систему уравнений с использованием уравнений Био, электрокинетики и полного набора уравнений Максвелла [8]. В работе [8] получены также аналитические выражения для коэффициента проницаемости, электропроводности и коэффициент электрокинетической связи. Согласно теории [5–8], при распространении в однородной среде плоской продольной акустической волны генерируется электрический сигнал, амплитуда которого линейно связана с амплитудой акустического сигнала, и

$$W = \frac{E_x}{u_x} \sim \frac{\varepsilon\varsigma m}{\eta\sigma}\omega^2, \qquad (1)$$

где E_x – напряженность электрического поля, u_x – амплитуда смещения частиц породы в направлении распространения плоской волны, ε – диэлектрическая проницаемость жидкости, ζ – электрокинетический потенциал (дзета-потенциал), m – пористость, η – динамическая вязкость, σ – электрическая проводимость, ω – частота колебаний.

Известные результаты физического моделирования и полевых исследований качественно совпадают с предсказаниями теории, но наблюдается большой разброс данных [9]. Это во многом обусловлено определенными упрощениями и ограничениями, сделанными при разработке теории эффекта, и большим разнообразием структурных особенностей, состава и физико-химических свойств горных пород. На сухих, газонасыщенных образцах горных пород сейсмоэлектрический эффект обычно не обнаруживается [10–14]. При небольшом увлажнении он появляется, интенсивно растет по мере увлажнения и при достижении оптимального содержания влаги сохраняется постоянным [13]. Для водомасляных эмульсий величина сейсмоэлектрической передаточной функции уменьшается с ростом доли неполярной жидкости [15] и “передаточная функция приблизительно одинаково реагирует на увеличение содержания в поровом пространстве пород газа и неполярной жидкости”. Другими словами, при предельном насыщении пород неполярной жидкостью сейсмоэлектрический эффект наблюдаться не должен. Наблюдаемая в экспериментах с электролитами зависимость W от частоты обычно более слабая, чем в теоретической формуле. Например, в работе [16] в диапазоне 5–15 кГц наблюдается линейная зависимость от частоты с небольшим увеличением наклона графика на более высоких частотах. В работе [14] в диапазоне 0.4–30 кГц также зарегистрирована примерно линейная зависимость W от частоты, но на частотах более 5 кГц наблюдается тенденция к уменьшению роста W и график выполаживается. Экспериментально обнаружено, что с ростом концентрации электролита напряженность электрического поля сначала возрастает до некоторой величины, а затем уменьшается и $W = W_0C^{-b}$ [13, 17, 18], где b – параметр, зависящий главным образом от электрохимических свойств твердого скелета. Это связано с сильным экранированием абсорбционного слоя возрастающим числом противоионов. Экспериментально обнаружено, что при наложении внешнего электрического поля проявляются нелинейные свойства сейсмоэлектрического эффекта: происходит значительное усиление отклика и регистрируются вторые гармоники с амплитудами большими, чем амплитуды первых гармоник [19–24].

Теория сейсмоэлектрического эффекта 2-го рода разработана для пористых сред с предельным насыщением однотипной жидкостью. Поведение реальных многофазных неравномерно насыщенных горных пород может не соответствовать выводам теории. Известно, что в однородно насыщенной среде плоской продольной акустической волной возбуждается электрическое поле

только одного направления. Однако, при распространении такой же волны в среде с латеральными петрофизическими неоднородностями, в общем случае, возбуждаются три ортогональные компоненты электрического поля, а также и магнитное поле [25]. Это может сильно повлиять на характер электрокинетических процессов. Примером является упомянутое выше проявление нелинейности сейсмоэлектрического эффекта в присутствии внешнего электрического поля. Особенности сейсмоэлектрического эффекта 2-го рода при сильной латеральной неоднородности по насыщению полярными и неполярными жидкостями еще недостаточно исследованы. В данной статье мы представили результаты физического моделирования, которые, как нам кажется, будут полезны для понимания сейсмоэлектрических процессов в гетерогенном структурно неоднородном природном массиве.

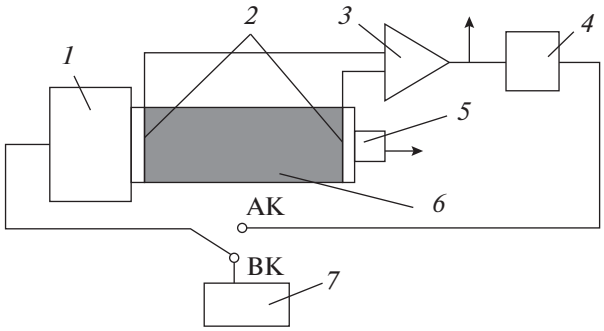

Рис. 1. Лабораторная установка: *1* – акустический пьезопреобразователь-вибратор, *2* – электроды, *3* – селективный усилитель, *4* – фазовращатель, 5 – акустический приемник, *6* – образец, *7* – генератор свип-сигналов, стрелки – выходы для регистрации акустических и электрических сигналов. АК и ВК – положения переключателя в режиме автоколебаний и вынужденных колебаний соответственно.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились с использованием лабораторной установки [26–28], схема которой приведена на рис. 1. При разном положении переключателя установка может попеременно работать в режиме вынужденных колебаний или в режиме автоколебаний. При работе в режиме вынужденных колебаний на вход генератора ультразвуковых колебаний подавался сигнал постоянной амплитуды с линейно модулированной частотой (свип). Частота изменялась в диапазоне 0.5–10 кГц с шагом 0.5 с по времени и 50 Гц по частоте. При работе в режиме автоколебаний генератор ультразвуковых колебаний отключался и замыкалась цепь обратной связи с выхода фазовращателя на вход вибратора. Баланс амплитуд и фаз, необходимый для возникновения автоколебаний, основанных на механоэлектрических преобразованиях в образце, создавался путем регулировки коэффициента усиления электрического сигнала и фазового сдвига в полученном замкнутом контуре. Во время опытов цилиндрический образец располагался таким образом, что у одного торца проводилось акустическое воздействие пьезовибратором, а у другого торца регистрировался акустический сигнал, сформированный в образце керна. Для регистрации акустических колебаний использован пьезоэлектрический преобразователь П113-(06–1.0). Коэффициент преобразования по напряжению – 18 ± 0.8 мВс^2/м. Синхронно с акустическим сигналом с прикрепленных на торцах электродов снимался электрический сигнал – разность потенциалов.

В экспериментах были использованы керны песчаника Berea Grey (США). Этот вид песчаника известен стабильностью своих физико-химических свойств и относится к высокопористым и высокопроницаемым породам. В песчанике Berea Grey зерна представлены кварцевым песком и скреплены между собой кремнеземом. В опытах были использованы цилиндрические образцы с диаметром 30 мм и длиной 60 мм. Коэффициент пористости 20%, скорость упругих продольных волн 2.24 км/с. Все образцы были предварительно просушены 4 часа при температуре 110°С и заключены в термоусадочную пленку для герметизации боковой поверхности. Однако, как показал анализ результатов проведенных экспериментов, полностью просушить образцы не удалось – все образцы содержали остаточную воду, в связи с чем далее будем называть их состояние перед началом опытов условно сухим.

Для создания неоднородного флюидонасыщения использовались керосин (неполярная жидкость) и водные растворы NaCl двух концентраций (полярная жидкость). Слабоминерализованная вода являлась раствором NaCl концентрации 0.05 моль/л, что соответствует типичной минерализации пластовых вод, сильноминерализованная – раствором NaCl концентрации 0.5 моль/л, что соответствует концентрации растворов вблизи соляных месторождений. Керосин является смесью жидких углеводородов. Он может иметь разный состав, в основном состоящий из насыщенных углеводородов с нулевым дипольным моментом молекул, с низкой полярностью, поляризуемостью и химической активностью.

Эксперимент с использованием каждого керна состоял из трех этапов. Сначала для условно сухого керна проводился опыт в режиме вынужденных колебаний с регистрацией сигналов акустического воздействия и электрического отклика. Затем запускался режим автоколебаний и установка некоторое время работала с контролем частоты колебаний. При работе в этом режиме пленка на боковой

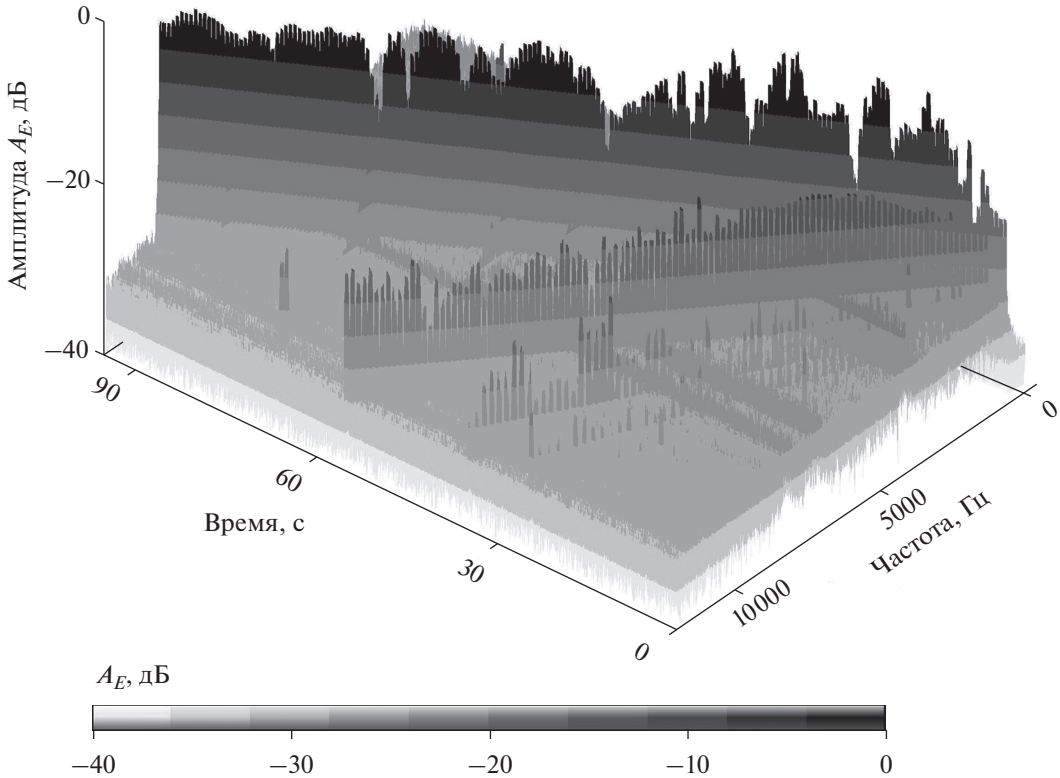

Рис. 2. Частотно-временной спектр электрического сигнала после создания латеральной неоднородности насыщения керосином.

поверхности керна прокалывалась, и с помощью пипетки под пленку вводилась жидкость. Количество жидкости не превышало 0.5 мл, что составляет 1.2% от объема образца и 6% от объема порового пространства керна. Автоколебания продолжались до резкого изменения частоты, что расценивалось как индикатор момента проникновения жидкости вглубь керна достаточно глубоко, чтобы отразиться на особенностях проявления сейсмоэлектрического эффекта. Время развития процесса до смены частоты составляло 60–80 минут. Для неоднородно насыщенных кернов повторно проводился опыт в режиме вынужденных колебаний с регистрацией сигналов акустического воздействия и электрического отклика. На другой день установка запускалась в режиме автоколебаний и работала в течение 6 часов. Затем в третий раз, через 24 ч после насыщения, повторно проводился опыт в режиме вынужденных колебаний с регистрацией сигналов акустического воздействия и электрического отклика.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

На первом этапе анализа измеренных акустических и сейсмический сигналов были рассчитаны их частотно-временные представления. При вычислении амплитудных спектров в скользящем временном окне использовалось быстрое преобразование Фурье (FFT) с наложением окна Ханна во временной области и усреднением по трем соседним окнам с 50%-м перекрытием сегментов. Пример частотно-временного спектра электрического сигнала при латерально неоднородном насыщении керосином показан на рис. 2. На нем хорошо просматриваются 1-я, 2-я и 3-я гармоники электрического сигнала.

Визуальный анализ всех спектров электрических и акустических сигналов показал, что они имеют сложную структуру. Помимо сигнала с частотой генератора, они содержат гармоники, а также помехи с постоянной или медленно меняющейся частотой. Чтобы устранить влияние помех и получить для дальнейшего анализа зависимости амплитуды гармоник электрического и акустического сигналов от частоты акустического воздействия, была разработана методика дополнительной обработки данных, схема которой подробно изложена в работе [28]. Она заключалась в следующем. По частотно-временным представлениям экспериментальных сигналов проводилось выделение ветвей экстремумов основной частоты и ее наиболее интенсивных гармоник с помощью оригинального алгоритма с ранжированием [28]. В алгоритме учитывалась возможность пере-

сечения с экстремумами высокоамплитудных помех и наличие соизмеримых амплитуд разных гармоник на одной и той же частоте, а также случайные аппаратурные флуктуации шагов свип-сигнала по времени и частоте. Для каждой ветви экстремумов получались две временные последовательности – для амплитуд и частот. Амплитудно-временные зависимости подвергались медианной фильтрации, чтобы устранить выбросы – артефакты, которые возникали при использовании FFT на интервалах скачков ступенчатого свип-сигнала. После этого формировались зависимости амплитуд гармоник от частоты воздействия на керн. Для этого на частотно-временных зависимостях выделялись интервалы постоянной частоты сигнала и на этих интервалах рассчитывались усредненные значения амплитудно-временных зависимостей. Следует подчеркнуть, что далее на графиках все зависимости представлены как функции частоты воздействия. Другими словами, для акустического сигнала и первой гармоники электрического сигнала частота сигнала и частота воздействия совпадают. Для второй гармоники электрического сигнала частота воздействия составляет половину частоты сигнала, определяемой по спектрально-временному представлению. Для каждого керна амплитудные спектры рассчитаны в децибелах с нормировкой по максимуму значений сигнала для условно сухого керна. При анализе результатов для сравнения амплитудных спектров использованы робастные статические оценки, не зависящие от вида статистических распределений – медианное значение, размах вариации $R = (X_{\max} - X_{\min})$ и коэффициент корреляции Спирмена.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ частотно-временных спектров электрического сигнала показал, что при существующей помеховой обстановке разработанная методика позволяет надежно выделять ветви экстремумов до величин –40 дБ. Для электрического сигнала в этот диапазон попадают все первые и вторые гармоники, а также третья гармоника керна при добавлении керосина, рис. 2. Для акустического сигнала в этот диапазон попадают только первые гармоники. В волновом акустическом поле присутствуют и высшие гармоники, но их амплитуда ниже –50 дБ. Во введении отмечалось, что согласно теории сейсмоэлектрического эффекта для предельно насыщенных сред амплитуда электрического отклика линейно связана с амплитудой акустического воздействия. Значит, высшие гармоники акустического сигнала теоретически могут создавать электрический отклик только с амплитудами ниже –50 дБ от основной гармоники электрического сигнала. В наших же экспериментах вторые гармоники электрического сигнала стабильно выше –40 дБ, а на низких частотах их амплитуды даже сравнимы с амплитудами первых гармоник, рис. 3. Из этого можно сделать вывод, что при сильно неоднородном насыщении горных пород сейсмоэлектрический эффект 2-го рода становится нелинейным.

Теоретически, при распространении плоской продольной акустической волны в однородно насыщенной среде возбуждается электрическое поле только одного направления – с поляризацией по вектору распространения акустической волны, формула (1). Для реальных многофазных неравномерно насыщенных горных пород условие однородности петрофизических свойств не выполняется. При распространении даже плоской продольной акустической волны в среде с латеральными неоднородностями, в общем случае, возбуждаются три ортогональные компоненты электрического поля, а также и магнитное поле. Численное моделирование показывает [25], что при переходе от модели влагонасыщенного полупространства к простой трехслойной модели с одним латерально неоднородным влагонасыщенным слоем сильно искажается функциональная связь модулей электрического и акустического поля, формула (1). Графики зависимости отношения W от параметров водонасыщенного слоя становятся негладкими, изрезанными, осциллирующими, с большой амплитудой выбросов. Сейсмоэлектрический эффект максимален в окрестности резкого изменения петрофизических свойств пород. Подобное возмущение монотонности и гладкости зависимостей, как показано далее, наблюдается и в наших экспериментах с неоднородным латеральным насыщением кернов. Также становится отчасти понятным проявление нелинейности сейсмоэлектрического эффекта. При распространении акустической волны в керне с латеральной неоднородностью по насыщению будет возникать неоднородное электрическое поле с компонентами не только по направлению распространения волны, но и в ортогональных направлениях. При этом существует ряд экспериментальных работ [19–24], в которых показано, что при наложении дополнительного внешнего ортогонального электрического поля может происходить значительное усиление сейсмоэлектрического эффекта и проявляться его нелинейность. Так что обнаружение интенсивных вторых гармоник электрических сигналов при неравномерном насыщении горных пород, рис. 3, вполне согласуется с известными экспериментальными результатами [19–24]. Однако, необходимо отметить, что механизм этого эмпирического результата не ясен.

В данной работе основное внимание мы уделим амплитудным и частотным особенностям наиболее мощной 1-ой гармоники электрического отклика и временной динамики регистрируемых

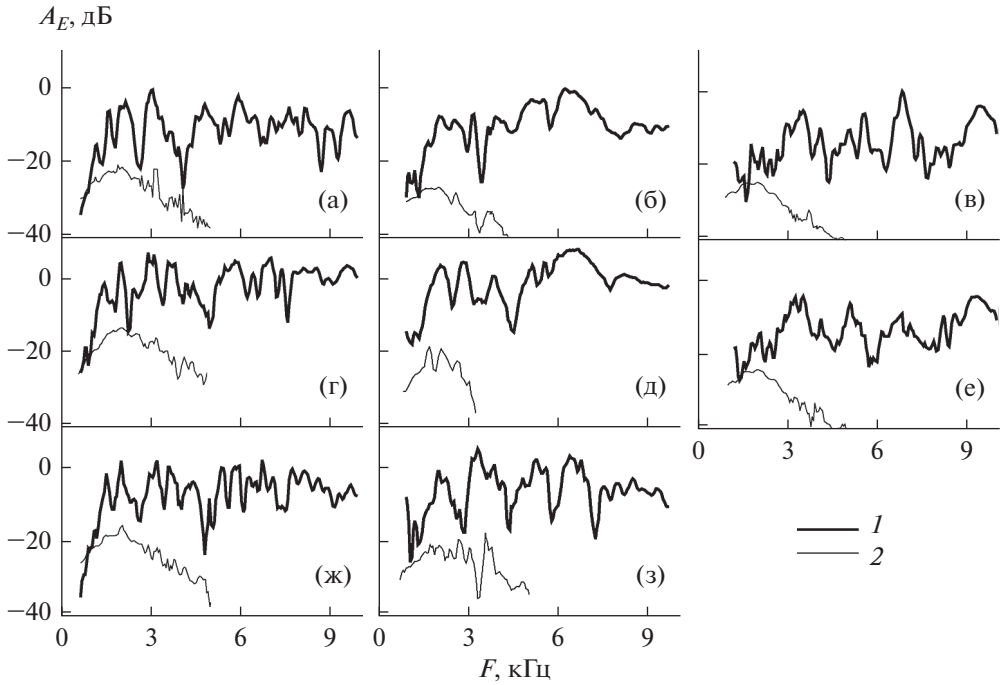

Рис. 3. Зависимость амплитуд электрического сигнала A_E от частоты вибровоздействия. В каждом столбце представлены результаты для одного и того же керна. Графики (а)–(в) – для условно сухих кернов; (г)–(е) – после добавления керосина, слабоминерализованной и сильноминерализованной воды, соответственно; (ж) и (з) – через сутки после добавлении жидкости и длительной вибрации в течение 6 часов в режиме автоколебаний. Нормировка по максимальному сигналу для сухого керна. На графиках показаны первая (линия *1*) и вторая (линия *2*) гармоники электрического сигнала.

электрических и акустических сигналов. На рис. 4. показаны спектры измеренного акустического сигнала на разных этапах проведения экспериментов. Амплитуда электрического сигнала, подаваемого на вход генератора ультразвуковых колебаний была постоянной для всех опытов и на всех частотах. При этом формы акустических спектров ускорений, измеренных на другом торце керна, даже для условно сухих кернов различаются. Однако максимальные значения амплитуд для всех трех условно сухих кернов примерно одинаковы. Резонансная частота однородного цилиндра с размерами керна лежит существенно выше частотного диапазона исследований. Положение локальных максимумов акустических спектров различных кернов отличаются, что не позволяет связать их с собственными частотами установки. По-видимому, на индивидуальность акустических спектров большое влияние оказывают особенности поровой структуры и наличие больших трещин. Для каждого керна в течение экспериментов формы спектров акустических сигналов изменялись незначительно. Коэффициенты корреляции спектров для одного и того же керна составляли 0.9–0.96, рис. 4.

По измеренным в экспериментах спектрам ускорений $\ddot{u}_x$ были пересчитаны спектры смещений по формуле $u_x = \ddot{u}_x/\omega^2$, где ω – частота вибровоздействия. Затем получены заисимости от частоты отношения амплитуд электрического и акустического сигналов $W = E_x/u_x$, которые после сглаживания в окне 1.5 кГц имеют вид, приведенный на рис. 5. Согласно теории сейсмоэлектрического эффекта [5–8] для предельно насыщенных пород должна наблюдаться квадратичная зависимость от частоты акустического воздействия $W \sim \omega^2$. В наших экспериментах с неравномерным насыщением в диапазоне частот 1–10 кГц наблюдаются существенно немонотонные зависимости. Интересно отметить, что на интервалах возрастания значений зависимость от частоты близка к квадратичной. После капельного добавления керосина и сильноминерализованной воды зависимости $W(\omega)$ на всех этапах эксперимента мало меняются по амплитуде и форме, рис. 5а и 5в. Для слабоминерализованной воды, наоборот, зависимость $W(\omega)$ очень сильно меняется по ходу эксперимента. После капельного добавления слабого раствора соли форма графика $W(\omega)$ остается почти такой же, как для условно сухого керна, но график сильно смещается по оси ординат в сторону увеличения значений $W(\omega)$, рис. 5б. После продолжительной вибрации форма графика $W(\omega)$ сильно изменяется и график смещается в сторону уменьшения значений $W(\omega)$. При этом, как показано на врезке

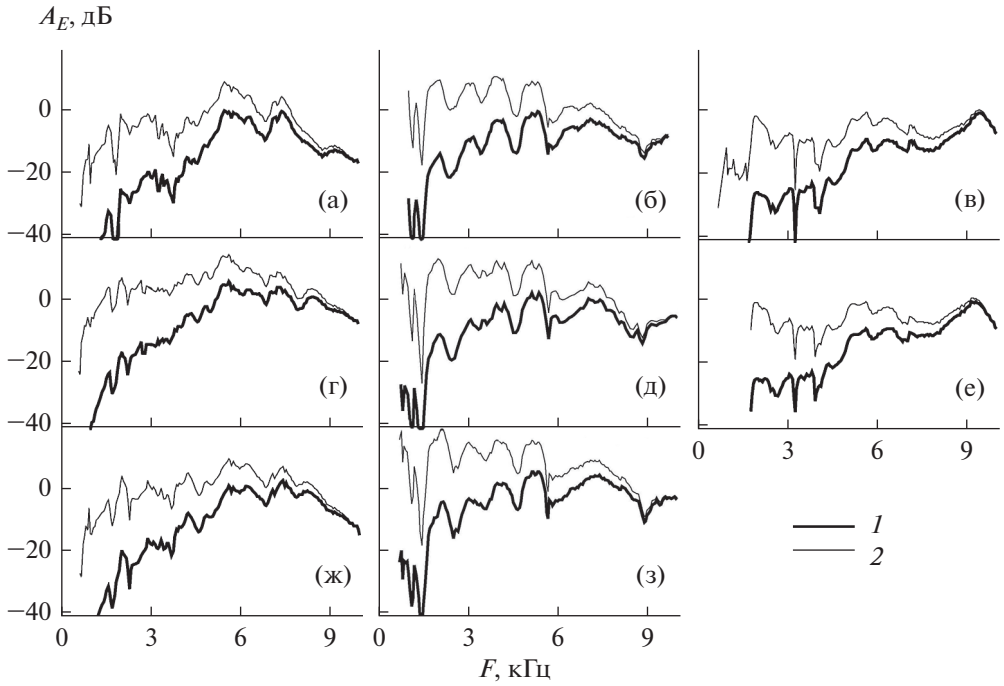

Рис. 4. Зависимость амплитуд акустического сигнала A_S от частоты вибровоздействия. В каждом столбце представлены результаты для одного и того же керна. Графики (а)–(в) – для условно сухих кернов; (г)–(е) – после добавления керосина, слабоминерализованной и сильноминерализованной воды, соответственно; (ж) и (з) – через сутки после добавлении жидкости и длительной вибрации в течение 6 часов в режиме автоколебаний. Нормировка по максимальному сигналу для сухого керна. На графиках показаны измеренные ускорения $\ddot{u}$ (линия *1*) и пересчитанные по ним смещения u (линия *2*).

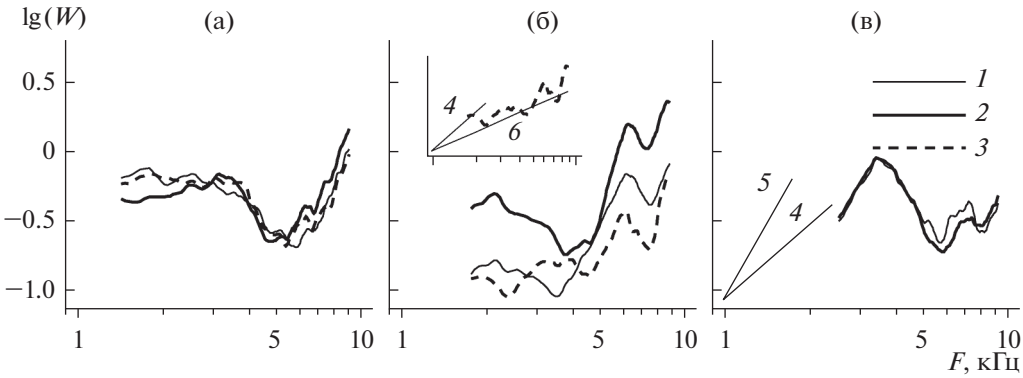

Рис. 5. Заисимость от частоты вибровоздействия F отношения амплитуд электрического и акустического сигналов $W = E_x/u_x$ при насыщении (а) керосином, (б) слабоминерализованной и (в) сильноминерализованной водой. Показаны графики для условно сухого керна (линия *1*), после добавления жидкости (линия *2*), через сутки после добавлении жидкости и длительной вибрации в течение 6 часов в режиме автоколебаний (линия *3*), график линейной зависимости $W = F$ (линия *4*), график квадратичной зависимости $W = F^2$ (линия *5*), график зависимости $W = F^{0.5}$ (линия *6*).

рис. 5б, зависимость стремится к монотонной $W = \omega^{\alpha}$, где $0.5 < \alpha < 1$.

Расмотрим более подробно вклад электрического и акустического сигналов в зависимость $W(\omega)$ для кернов с разным типом флюидонасыщения. Спектры электрических сигналов, зарегистрированных на разных этапах экспериментов, показаны на рис. 3. На рис. 6 показаны соответствующие разностные спектры, позволяющие оценить происходящие в ходе эксперимента изменения. Аналогичные результаты для акустических сигналов показаны на рис. 4 и рис. 7. На рис. 8 в графическом виде приведены значения статистических оценок, позволяющих сравнить особенности временной динамики акустических и электрических полей в опытах с разным типом флюидонасыщения.

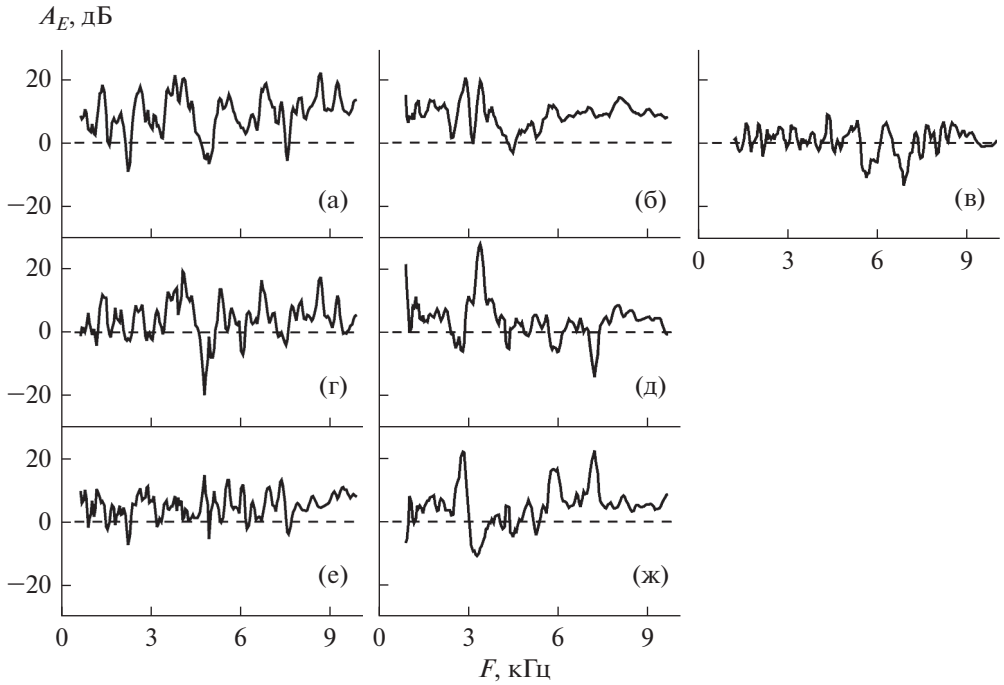

Рис. 6. Приращение спектральных амплитуд первых гармоник электрического сигнала ΔA_E при насыщении кернов керосином, слабоминерализованной и сильноминерализованной водой. В каждом столбце представлены результаты для одного и того же керна. (а)–(в) – Разность между спектрами флюидизированных и условно сухих кернов; (г) и (д) – разность между спектрами флюидизированных кернов после длительной вибрации и условно сухих кернов; (е) и (ж) – разность между спектрами флюидизированных кернов до и после длительной вибрации.

Как отмечалось во введении, согласно теории и известным результатам физического моделирования, сейсмоэлектрический эффект 2-го рода на сухих кернах наблюдаться не должен, но мы его наблюдаем на всех “сухих” кернах, рис. 3. По-видимому, существование эффекта объяснятся наличием остаточной воды. Хотя керны, как упоминалось выше, просушивались длительное время при высокой температуре и боковая поверхность покрывалась пленкой, но вода могла остаться внутри изолированных пор, в узких капиллярах и в виде влажных пленок на поверхности пор и трещин.

После добавления сильно минерализованной воды существенных изменений в спектрах первой и второй гармоник электрического сигнала практически не наблюдается. Исключение составляет узкий диапазон частот 5.45–7.15 кГц, где размах вариаций разности спектров первой гармоники составляет 22.3 дБ, рис. 6в. В этом же интервале частот, как показано на рис. 5в, происходит резкое изменение зависимости $W(\omega)$. В спектре акустических колебаний также существенных изменений не происходит. После увлажнения концентрированным раствором соли повторно автоколебания в механоэлектрической схеме воспроизвести не удалось, поэтому длительное вибровоздействие в этом случае не проводилось. Измеренный через 24 ч электрический отклик оказался сильно ослабленным по амплитуде и на приведенных рисунках он не показан. Уменьшение амплитуды электрического отклика с течением времени является ожидаемым для всех типов флюидонасыщения. Этому способствует несколько факторов. За счет фильтрации жидкости вглубь керна контрастность по насыщению размывается. При длительном вибровоздействии происходит также перераспределение заряженных ионов, компенсирующее электрическое поле в направлении, ортогональном оси акустического воздействия. Противоионы частично адсорбируются поверхностью твердой фазы. В случае высококонцентрированного электролита дополнительное уменьшение электрического отклика происходит за счет увеличения концентрации остаточной поровой воды, присутствующей в условно сухих кернах.

Для керна с добавлением слабоминерализованной воды происходит сильное увеличение амплитуды электрического отклика. В среднем по всему спектру амплитуда основной гармоники увеличивается на 9 дБ. В этом случае также существует узкий диапазон сильных вариаций разности спектров первой гармоники – 2.5–5.0 кГц, рис. 6б. Так же, как и для высококонцентрированного раствора, в этом частотном диапазоне происходит резкое изменение характера зависимости $W(\omega)$. Для остальных частот форма спектра сохраняется без особых изменений по сравнению со спектром условно сухого керна, с пропорцио-

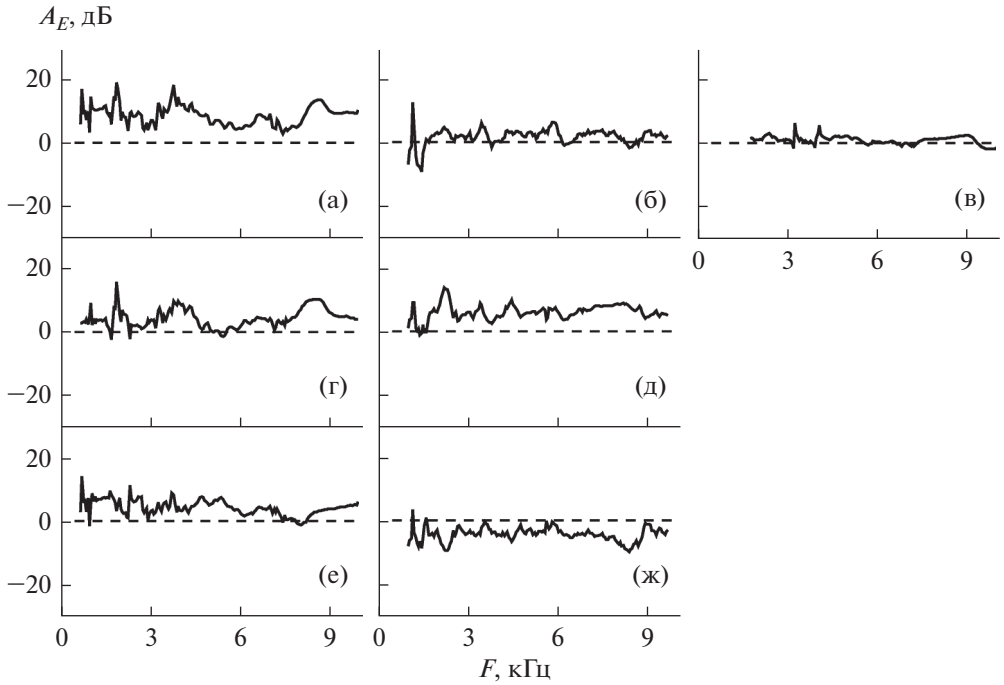

Рис. 7. Приращение спектральных амплитуд акустического сигнала ΔA_S при насыщении кернов керосином, слабоминерализованной и сильноминерализованной водой. В каждом столбце представлены результаты для одного и того же керна. (а)–(в) – Разность между спектрами флюидизированных и условно сухих кернов; (г) и (д) – разность между спектрами флюидизированных кернов после длительной вибрации и условно сухих кернов; (е) и (ж) – разность между спектрами флюидизированных кернов до и после длительной вибрации.

нальным увеличением амплитуд. Коэффициент ранговой корреляции спектров электрического отклика для условно сухого и увлажненного кернов равен 0.8. Увеличение амплитуды электрического отклика при сохранении формы его спектра подтверждает предположение о том, что существование электрического отклика условно сухих кернов связано с наличием в них остаточной воды. Амплитуда второй гармоники при увлажнении увеличивается более чем на 5 дБ. Спектр акустических колебаний при капельном добавлении раствора соли существенно не изменяется.

Ослабление сейсмоэлектрического эффекта при увеличении концентрации электролита соответствует теории и известным экспериментальным данным [13, 14, 17, 18]. Согласно упрощенной теории двойного электрического слоя [29], с ростом концентрации электролита C электрокинетический потенциал снижается как $\zeta \sim 1/\sqrt{C}$. При использованных в эксперименте концентрациях соли 0.05 и 0.5 моль/л электрокинетический потенциал должен измениться примерно в 3 раза. В нашем эксперименте среднее изменение электрического отклика после увлажнения для разных концентраций отличается в 2.5 раз. Это хорошее совпадение и оно может свидетельствовать в пользу того, что в полученных результатах электрокинетические явления в двойном электрическом слое играют существенную роль. Добавление слабоминерализированной воды увеличивает площадь двойного электрического слоя, что, наряду с влиянием неоднородности электрического поля, приводит к усилению сейсмоэлектрического эффекта.

В обсуждаемой серии экспериментов сильное увеличение электрического отклика наблюдается и при латерально неоднородном слабом насыщением керна керосином. Это резко контрастирует с известными результатами физического моделирования в случае равномерного насыщения кернов [15], когда отношение амплитуд электрического отклика и акустического воздействия уменьшается с ростом доли неполярной жидкости. При добавлении керосина увеличение электрического сигнала даже больше, чем при добавлении слабого раствора соли. Для первой гармоники увеличение электрического сигнала составляет 9.7 дБ, а для второй гармоники около 5 дБ. При этом форма спектра электрического сигнала сильно изменяется на всех частотах. Коэффициент корреляции спектров электрического отклика для условно сухого и флюидизированного кернов равен 0.3, а размах вариаций разности спектров первой гармоники составляет 31.3 дБ, рис. 6а.

Еще один неожиданный результат – это сильное увеличение амплитудного спектра акустиче-

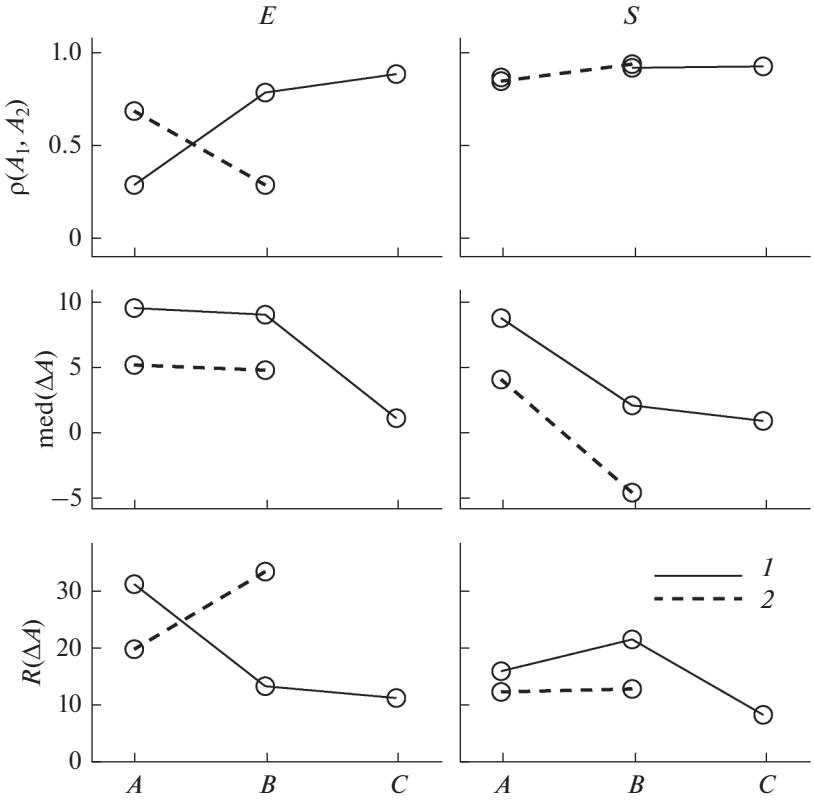

Рис. 8. Статистические оценки, рассчитанные для электрических (слева) и акустических (справа) сигналов, иллюстрирующие изменения амплитудных спектров сигналов во время экспериментов. Показаны результаты сравнения спектров для условно сухих кернов и после добавления жидкости (линия *1*), для флюидизированных кернов до и после длительной вибрации (линия *2*). Метки "*A*", "*B*", "*C*" индексируют результаты для кернов, насыщенных керосином, слабоминерализованной и сильноминерализованной водой. Верхний ряд – значения коэффициента корреляции Спирмена; в середине – медианное значение разностей спектров сигналов; внизу – размах вариаций разности спектров.

ского сигнала и изменение его формы, рис. 7а. Акустический спектр увеличивается в среднем на 9 дБ, что компенсирует увеличение амплитуды электрического сигнала и стабилизирует значение зависимости $W(\omega)$, рис. 5а. Добавление жидкости в объеме 1.2% от объема керна не меняет существенно ни массы образца, ни скорости продольных волн, поэтому не должно бы приводить к существенному изменению в колебательной скорости при одинаковом воздействии на образец. К тому же изменение спектра колебательной скорости не происходит при добавлении слабого раствора соли, но после добавления керосина происходит. После шестичасового вибровоздействия в режиме автоколебаний изменения акустического спектра происходят для кернов уже при обоих типах насыщения, рис. 7. Причем, для керна с керосином амплитудный спектр акустического сигнала снижается на 4.3 дБ таким образом, что опять сохраняется вид зависимости $W(\omega)$ и временная кореллированность амплитуд сейсмического и электрического сигналов. При этом амплитудный спектр акустического сигнала для раствора соли наоборот увеличивается на 4.4 дБ.

Основная гармоника электрического отклика через сутки после насыщения и продолжительной шестичасовой вибрации уменьшается и для керосина, и для слабо минерализованной воды, рис. 6е и 6ж. Медианное значение разности спектров до и после длительного вибровоздействия составляет 5.3 дБ для керосина и 4.9 дБ для водного раствора NaCl. Но формы спектров электрических сигналов ведут себя совершенно по-разному. Форма спектра при неоднородном насыщении керна керосином почти не изменяется после длительной вибрации, а спектр электрического отклика для слабо минерализованной воды претерпевает очень сильные изменения. Соответствующие значимые значения ранговой корреляции спектров для керосина и водного раствора 0.7 и 0.3, соответственно. Более того, сравнивая формы спектров на рис. 3з и 4з, можно сделать заключение, что после продолжительной вибрации для слабого раствора соли в электрических колебаниях формируются резонансные частоты, которые не совпадают с резонансными частотами акустических колебаний.

Обнаруженные особенности сейсмоэлектрического эффекта 2-го рода при неоднородном слабом насыщении полярными и неполярными жидкостями трудно обоснованно объяснить, но мы полагаем, что они связаны именно с сильной латеральной неоднородностью по насыщению, в окрестностях которой формируется сильно неоднородное поле электромагнитного отклика. Керосин, в зависимости от технологии производства, может содержать различные присадки, небольшое количество воды, иметь примеси сернистых, азотистых или кислородных соединений. При фильтрации керосина в кернах песчаника в него попадают механические примеси в виде частиц кварца, кремнезема, глины. Остаточная вода в порах кернов, химические и механические примеси в условиях акустической вибрации способствуют образованию устойчивых водно-керосиновых эмульсий и формированию слоистых и пространственных структур дисперсной фазы [30]. Из-за наличия воздуха, при фильтрации в поровом пространстве вероятно образование сложных трехфазных воздухо-водно-керосиновых эмульсий. Распределение капель по размерам в таких эмульсиях является достаточно широким. С одной стороны, крупные капли дисперсной фазы способны “запирать” потоки жидкости, способствуя стабилизации формы и положения неоднородности по насыщению керна керосином. Этим можно объяснить долговременную стабильность формы спектра электрического сигнала. С другой стороны, мелкие капли работают на генерацию электрического отклика. Каждая дисперсная частица имеет свой двойной электрический слой. В отсутствии внешнего электрического поля каждая частица имеет внешний заряд, знак которого зависит от природы центрального ядра. При наличии внешнего электрического поля происходит поляризация зарядов дисперсных капель. При достаточно большом числе капель дисперсной жидкости за счет ориентации по полю образуются линейные и пленочные структуры повышенной проводимости за счет “прыжковых” механизмов переноса ионов между контактирующими каплями [30]. Движение заряженных, поляризованных частиц и деформации дисперсных структур при акустическом воздействии будут вносить свой вклад в формирование стороннего электрического поля. В свою очередь, переменное неоднородное электромагнитное поле, наиболее сильное вблизи границ резкой смены типа насыщения, будет вызывать возмущение деформаций дисперсных структур. Такое самосогласованное взаимодействие способно вызвать параметрические резонансные явления и усиление сейсмоэлектрического эффекта во внешнем неоднородном электромагнитном поле [31]. Обнаруженные в данных экспериментах эффекты должны наблюдаться и в природном массиве при фильтрации под воздействием сейсмических волн в области водонефтяных контактов, а также вблизи подготовки очага землетрясения при внедрении флюида в образующиеся и растущие трещины.

ВЫВОДЫ

Наши эксперименты показали, что латеральная неоднородность по насыщению сильно влияет на особенности проявления сейсмоэлектрического эффекта 2-го рода. Хотя трудно дать достоверные объяснения всем обнаруженным явлениям, можно полагать, что они обусловлены формированием сильно неоднородного электромагнитного поля, которое возникает при распространении акустических волн в горных породах с петрофизическими неоднородностями любой природы. Наиболее интересными и загадочными фактами являются большое усиление электрического отклика при создании неоднородности по насыщению неполярной жидкостью, а также сильное изменение акустического сигнала при постоянном по величине внешнем воздействии. Практический интерес для развития новых технологий имеют наблюдаемые различия в проявлении спектральных особенностей и временной динамики согласованных акустических и электрических сигналов при разном типе флюидонасыщения.

Необходимо добавить несколько слов о том, что породило наш интерес к данной теме. Как упоминалось выше, из классической теории следует, что при насыщении пород неполярной жидкостью и газом сейсмоэлектрический эффект 2-го рода наблюдаться не должен. Однако, имеются полевые экспериментальные результаты [32–36], которые свидетельствуют о приуроченности областей интенсивных механоэлектрических преобразований к нефтегазовым месторождениям. Интересно, что некоторые результаты полевых исследований напрямую согласуются с результатами нашего физического моделирования.

В работе [33] приведены результаты измерения взаимных корреляционных функций временных выборок естественного сейсмического и электрического шума Земли. Измерения проводились в диапазонах частот 0.1–20 Гц по профилю на участках газоконденсатного месторождения с продуктивными бассейнами на глубинах около 2 км. В обоих случаях обнаружено, что над продуктивными бассейнами величина корреляционной функции в 5–7 раз выше, чем на удалении более 3 км. Причем аномалия корреляции является стабильной и подтверждается по измерениям с годичным интервалом [32]. Этот эффект является прямой аналогией положительной корреляции амплитуд акустического и сейсмического полей при неоднородном насыщении керосином, которая наблюдается в наших опытах. Над газовыми и нефтяными месторождениями можно ожидать наличие

рассеянных углеводородов, проникающих в вышележащие слои через дефекты покрышки. Также за счет природных и техногенных воздействий над покрышками формируются небольшие газовые и нефтяные карманы, образованные за счет перетоков флюида. Таким образом, пространство над залежью является крупномасштабным аналогом неоднородно насыщенного углеводородами керна. Выделенный объем испытывает внешние техногенные и природные воздействия. В частности, распространяющиеся компоненты сейсмического и электрического шума варьируются во времени в сотни раз, а техногенное воздействие при распространении по разломным зонам проникает до глубин не менее 6 км [37–39]. В пространстве слагающих пород вблизи петрофизических неоднородностей формируются сильные неоднородности физических полей. В условиях неоднородного насыщения углеводородами, под действием внешних факторов и самосогласованного взаимодействия сейсмическое и электрическое поля, как показывает физическое моделирование, становятся коррелированными, рис. 5 и 8. При этом в массиве горных пород энергия может забираться как из внешних распространяющихся компонент фоновых электромагнитных и акустических полей, так и из накопленной энергии внутренних неоднородностей.

В работе [40] описан эксперимент с сильным изменением уровня фоновых акустических колебаний после акустического воздействия в скважине, характер которых противоположен для нефтенасыщенных и водонасыщенных пластов. Частота регистрации 0.01–8 кГц, частота акустического воздействии 20 кГц. После акустического воздействии практически во всем диапазоне частот в скважине с водонасыщенным коллектором наблюдалось сильное уменьшение амплитуд колебаний, в скважине с нефтенасыщенным коллектором, наоборот, сильное увеличение амплитуд фоновых колебаний. Условия нашего моделирования не полностью соответствуют полевому эксперименту в работе [40], но в наших опытах также наблюдается противоположная тенденция изменения амплитуд акустического поля после продолжительного вибровоздействия, рис. 7 и 8. Во всем диапазоне частот разность амплитуд акустического поля до и после воздействия для керосина положительна, а для воды отрицательна.

Наши исследования по сейсмической эмиссионной томографии показывают [37, 41, 42], что при небольшом по энергии внешнем воздействии на горный массив на территории нефтегазовых месторождений происходит трудно объяснимая сильная активизация сейсмической эмиссии в большом объеме среды с радиусом в несколько километров от источника воздействия. В свете полученных результатов можно предполагать участие в усилении акустических сигналов самосогласованных механоэлектрических преобразований, энергетика которых частично обеспечивается и за счет энергии естественных магнитных и электрических полей, существующих в массиве пород.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИПНГ РАН по теме № АААА-А19-119013190038-2 и ИФЗ РАН по теме № 0144-2014-0096.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Уваров В.Н.* Электромагнитно-деформационные волны земной коры // Геофизический журнал. 2016. Т. 38. № 6. С. 180–185.
2. *Blau L., Statham L.* USA Patent 2054067. 1936.
3. *Иванов А.Г.* Сейсмо-электрический эффект второго рода // Изв. АН СССР. Сер. географ. геофиз. 1940. № 5. С. 699–727.
4. *Иванов А.Г.* Эффект электризации пластов земли при прохождении через них упругих волн // Доклады АН СССР. 1939. № 1. С. 41–43.
5. *Френкель Я.И.* К теории сейсмических и сейсмоэлектрических явлений во влажной почве // Изв. АН СССР. Сер. географ. геофиз. 1944. Т. 8. № 4. С. 133–150.
6. *Biot M.A.* Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solids // J. Acoust. Soc. Am. 1956. V. 28. P. 168–186.
7. *Pride S.R., Garambois S.* Electroseismic wave theory of Frenkel and more recent developments // J. Engineering Mechanics. 2005. V. 131. № 9. P. 898–907.
8. *Pride S.R.* Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media // Phys. Rev. 1994. B. V. 50. № 21. P. 15678–15696.
9. *Светов Б.С.* Основы геоэлектрики. 2008. М.: Издательство ЛКИ. 656 с.
10. *Анциферов М.С.* Лабораторное воспроизведение сейсмо-электрического эффекта второго рода // Докл. АН СССР. 1958. Т. 121. № 5. С. 827–829
11. *Пархоменко Э.И., Чжао Цзе-Сань.* Исследование влияние влажности на величину сейсмоэлектрического эффекта осадочных пород // Изв. АН СССР. Геофизика. 1964. № 2. С. 68-73.
12. *Пархоменко Э.И., Гаскаров И.В.* Скважинные и лабораторные исследования сейсмоэлектрического эффекта второго рода в горных породах // Физика Земли. 1971. № 9. С. 88–92.
13. *Пархоменко Э.И.* Основные закономерности сейсмоэлектрического эффекта осадочных пород и пути его использования в геофизике // Физические свойства горнах пород при высоких давлениях и температурах. Ред. Любимова Е.А. М: Наука, 1977. С. 201–208.
14. *Агеева О.А., Светов Б.С., Шерман Г.Х., Шипулин С.В.* Сейсмоэлектрический эффект второго рода в горных породах // Геология и геофизика. 1999. Т. 4. № 8. С. 1251–1257.
15. *Агеева О.А.* Использование сейсмоэлектрических преобразований в породах для прогнозирования

характера насыщения порового пространства // Геофизика. 2008. № 1. С. 16–21.

16. *Мигунов Н.И., Кокорев А.А.* Динамические особенности сейсмоэлектрического эффекта водонасыщенных горных пород // Физика земли. 1977. № 6. С. 114–118.

17. *Chen B., Mu Y.* Experimental studies of seismoelectric effects in fluid- saturated porous media // J. Geophys. Engineering. 2005. V. 2. № 3. P. 222–230

18. *Симонян С.С.* Зависимость сейсмоэлектрического эффекта от одноосного давления при насыщении образцов растворами поваренной соли // Известия АН АрмССР. 1987. Науки о Земле. XL. № 3. С. 56–59.

19. *Черняк Г.Я.* О прямом и обратном сейсмоэлектрических эффектах в осадочных породах при синусоидальном возбуждении // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1975. № 7. С. 117–121

20. *Черняк Г.Я.* О физической природе сейсмоэлектрического эффекта горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1976. № 2. С. 108–112.

21. *Черняк Г.Я.* Электромагнитные методы в гидрогеологии и инженерной геологии. М: Недра, 1987. 214 с.

22. *Тереньтьев В.Г.* Исследования сейсмоэлектрического эффекта второго рода в лабораторных условиях // Записки Горного института. 1992. Т. 130. С. 13–17.

23. *Нейштадт Н.М., Эппельбаум Л.В.* Применение пьезоэлектрических и сейсмоэлектрических явлений в разведочной геофизике // Российский геофизический журнал. 2012. № 51–52. С. 63–80.

24. *Зейгарник В.А., Ключкин В.Н.* Физическое моделирование электросейсмического эффекта в горных породах // Триггерные эффекты в геосистемах. Материалы третьего Всероссийского семинара-совещания г. Москва, 16–19 июня 2015 г. М.: GEOS, 2015. С. 252–258.

25. *Московский И.Г., Балабан О.М., Федорова О.С., Кочетков А.В.* Математическое моделирование сейсмоэлектрического эффекта второго рода, порождаемого плоскими упругими волнами в пористых влагонасыщенных средах // Интернет-журнал “Науковедение”. 2015. Т. 7. № 1. http:// naukovedenie.ru/PDF/ 04TVN115.pdf

26. *Камшилин А.Н., Казначеев П.А.* Флюиды как управляющий параметр механоэлектрических колебаний // Триггерные эффекты в геосистемах. Материалы третьего Всероссийского семинара-совещания / Ред. Адушкин В.В., Кочарян Г.Г. М: ГЕОС, 2015. С. 273–278.

27. *Kamshilin A.N., Volkova E.N., Kuzichkin O.R., Sokolnikov M.A.* Self-oscillations in rocks, results of laboratory experiments // Annals of geophysics. 2004. V. 47. № 1. P. 93–100.

28. *Чеботарева И.Я., Камшилин А.Н.* Исследование механоэлектрических преобразований в горных породах с малой степенью флюидонасыщения // Радиопромышленность. 2018. № 1. С. 18–26.

29. *Волков В.А.* Коллоидная химия. Поверхностные явления и дисперсные системы. СПб., М., Краснодар: Лань, 2015. 600 с.

30. *Евдокимов И.Н.* Структурные характеристики промысловых водонефтяных эмульсий. М.: РГУ нефти и газа им. Губкина, 2012. 477 с.

31. *Доровский С.В., Доровский В.Н., Блохин А.М.* О возможностях электроразведки при исследовании устойчивости водонефтяных слоистых систем // Геология и геофизика. 2006. № 11. С. 1185–1191.

32. *Shaidurov G.Ya., Kudinov D.S., Potylitsyn V.S.* On the observations of seismic-electric effect and the induced polarization potential on Minusinsk gas deposit field in the natural noise fields of the Earth // J. Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2016. V. 9(8). P. 1353–1365.

33. *Shaidurov G.Ya., Kudinov D.S., Potylitsyn V.S., Shaidurov R.G.* Observation of the seismoelectric effect in a gas condensate field in the Earth’s natural electromagnetic and seismic noise of 0.1–20 Hz // Russian Geology and Geophysics. 2018. V. 59. № 5. P. 566–570.

34. *Бобровников Л.З., Дегтерев А.Х., Шнюков Е.Ф., Маслаков Н.А.* Прямой сейсмоэлектромагнитный метод поиска газогидратов метана черного моря // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2012. № 4. С. 72–81.

35. *Потапов О.А., Лизун С.А., Кондрат В.Ф.* Основы сейсмоэлектроразведки. М.: Недра, 1995. 268 с.

36. *Сафонов А.С.* Электродинамическая разведка. М.: ВНИГНИ, 2017. 150 с.

37. *Chebotareva I.Ya.* Emission seismic tomography – the tool to study fracturing and fluidodynamics of the Earth crust // Georesursy=Georesources. V. 20. № 3(2). P. 238–245. https://doi.org/10.18599/grs.2018.3.238-245

38. *Чеботарева И.Я.* Методы трассировки лучей в эмиссионной сейсмической томографии // Физика Земли. 2018. Т. 54. № 2. С. 201–213.

39. *Чеботарева И.Я.* Методы пассивного исследования геологической среды с использованием сейсмического шума // Акуст. журн. 2011. Т. 57. № 6. С. 844–853.

40. *Дрягин В.В., Кузнецов О.Л., Стародубцев А.А., Рок В.Е.* Поиск углеводородов методом вызванной сейсмоакустической эмиссии // Акуст. журн. 2005. Т. 51. Приложение (Геоакустика). С. 66–73.

41. *Володин И.А., Чеботарева И.Я.* Сейсмическая эмиссия в зонах техногенных воздействий // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 5. С. 505–517.

42. *Чеботарева И.Я.* Эмиссионная томография – базовый инструмент для технологий изучения месторождений углеводородов // Актуальные проблемы нефти и газа. 2017. Т. 2(17). С. 24. Эл. ресурс: http://oilgasjournal.ru