

**И. Я. Чеботарева<sup>1</sup>, А. Н. Камшилин<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Институт проблем нефти и газа РАН, <sup>2</sup> Институт физики Земли РАН

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ С МАЛОЙ СТЕПЕНЬЮ ФЛЮИДОНАСЫЩЕНИЯ

*В работе описана экспериментальная установка и методика обработки данных для исследования акустоэлектрических преобразований в образцах горной породы с различной степенью увлажнения. Приведены результаты исследований для сухого и увлажненного керосином зерна песчаника Berea Grey при акустическом воздействии линейно-модулированным по частоте сигналом в диапазоне частот 0,7–10 кГц. Выявлена сильная нелинейность эффекта, проявляющаяся в появлении второй и третьей гармоники, и увеличение амплитуды отклика электрического сигнала. В нижнем диапазоне частот амплитуда второй гармоники колебаний напряженности электрического поля сравнима с амплитудой первой и даже может ее превышать. При капельном добавлении керосина мощность электрического сигнала меняется в разы с сильным изменением формы спектра сигнала. При этом форма спектра акустического сигнала практически неизменна. Сильная чувствительность коэффициента акустоэлектрических преобразований горных пород к увлажнению, существенно меняющая амплитуду и фазу отклика, интересна с точки зрения разработки дистанционных методов определения типа флюидонасыщения горной породы и методов прогноза геофизических катастроф.*

**Ключевые слова:** физическое моделирование, сейсмоэлектрический эффект, горные породы, тип флюидонасыщения, латеральная неоднородность.

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

**I. Ya. Chebotareva<sup>1</sup>, A. N. Kamshilin<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Oil and Gas Research Institute RAS, Moscow, Russia, <sup>2</sup> Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Russia

# RESEARCH OF MECHANOELECTRIC TRANSFORMATIONS IN ROCK WITH A SMALL DEGREE OF FLUID SATURATION

*The paper describes an experimental plant and data processing technique for investigations of acoustoelectric transformations in rock samples with varying degrees of moistening. The results of investigations are presented for dry and moistened with kerosene core of Berea Grey sandstone under acoustic effect produced by linearly frequency-modulated signal in 0,7–10 kHz band. The was discovered a strong effect nonlinearity expressing itself in the second and third harmonics emerging, and an increase in the amplitude of the response of the electric signal. In the lower frequency band the amplitude of the second harmonic of the electric field intensity oscillations is comparable with the amplitude of the first one and can even exceed it. With the dropwise addition of kerosene, the power of the electrical signal varies at many times with a strong change in the shape of the signal spectrum. Therewith the shape of the acoustic signal spectrum is practically unchanged. The strong sensitivity of the coefficient of acoustoelectric transformation of rocks to moistening, which significantly changes the amplitude and phase of the response, is interesting from the point of view of developing remote methods for identifying the type of fluid saturation of rocks and methods for predicting geophysical catastrophes.*

**Keywords:** physical modeling, seismoelectric effect, rocks, type of fluid saturation, lateral inhomogeneity.

For citation: Chebotareva I. Ya., Kamshilin A. N. Research of mechanoelectric transformations in rock with a small degree of fluid saturation. Radiopromyshlennost, 2018, no. 1, pp. 18–26 (In Russian).

## Введение

В представленной работе описана методика совместного анализа синхронных записей акустического и электрического волнового поля в образцах керна горной породы при воздействии вибрацией с линейно модулированной частотой 0,5–10 кГц при различном типе флюидизации керна. Методика проиллюстрирована на экспериментах с сухим керном и керном с добавлением небольшого количества керосина.

Данные исследования имеют как академическое, так и практическое значение. Сейсмоэлектрический эффект второго рода, открытый А.Г. Ивановым [1], заключается в возбуждении колебаний электромагнитного поля при распространении акустических волн во флюидонасыщенных пористых горных породах. Механизм прямого и обратного эффекта связывается с механоэлектрическими преобразованиями энергии, возникающими при смещении проводящего флюида относительно твердого скелета пород-коллекторов [2, 3]. Согласно теории сейсмоэлектрического эффекта, основанной на работах Я.И. Френкеля [4] и М. Био [5], между напряженностью электрического поля и амплитудой акустического воздействия установлена линейная связь. Однако в некоторых экспериментах, например в слабопористых и малоувлажненных породах, при дополнительном воздействии электрического напряжения могут наблюдаться нелинейные явления [6–9]. Следует отметить, что малоувлажненные среды не рассматривались в теории Френкеля, так что на них известные теоретические результаты могут и не распространяться. Кроме того, существуют другие механизмы генерации электрических сигналов, например, при деформации двойных электрических слоев на границе раздела твердых фаз и контактах твердых тел [10–13].

Имеющиеся экспериментальные данные также в основном относятся к образцам с большой степенью увлажнения и к исследованиям на отдельных выбранных частотах воздействия. Исследований особенностей механоэлектрических преобразований в малоувлажненных горных породах в широком диапазоне частот явно недостаточно, что говорит об актуальности такого рода работ по физическому моделированию.

Получение новых знаний о механоэлектрических преобразованиях имеет и большое практическое значение для повышения качества геофизических работ на месторождениях полезных ископаемых и прогноза подготовки геофизических катастроф [13–18]. С 30-х годов прошлого века в разведочной геофизике используются эффекты взаимодействия электромагнитного и акустического полей при распространении в горных породах [19–23]. Известно, что прямые поиски нефти и газа с использованием

информации о скорости сейсмических волн, удельного сопротивления пород, тепловых и гравитационных аномалий не дают однозначных достоверных результатов. Добавление информации, полученной электромагнитными методами, не решает полностью проблемы в силу их недостаточного совершенства. В 80-х годах прошлого века был предложен метод эмиссионной сейсмической томографии [24–27], позволяющий по записям естественного сейсмического фона на поверхности проводить визуализацию различных глубинных объектов сейсмической эмиссии и изучать временную изменчивость параметров излучения. Одним из тормозящих факторов широкого применения метода для практических приложений является недостаточное понимание механизма генерации сейсмической эмиссии – отдельные предложенные механизмы объясняют только отдельные факты явления [28]. Возможно, универсальный механизм надо строить на базе механоэлектрических преобразований, так как существуют экспериментальные факты, указывающие на такую связь.

Ниже представлены первые результаты экспериментов по физическому моделированию вибровоздействия на пласт с сухим керном и керном с добавлением небольшого количества неполярной жидкости – керосина.

## Образцы керна

В опытах использованы образцы керна высокопористого песчаника Berea Grey (США). Этот вид песчаника широко используется в исследованиях по физическому моделированию, так как керн проявляет стабильность физико-химических свойств. Песчаник Berea Grey является осадочной породой с высокой пористостью и проницаемостью, зерна которой представлены кварцевым (quartz) песком и скреплены между собой кремнеземом (silica). Образец керна имел длину 60 мм, диаметр 30 мм, вес 102 г. Образцы были вырезаны из одного большого моноблока, почти целиком состоящего из кварца с пористостью около 20%. Скорость упругих продольных волн составляла  $2,240 \pm 0,010$  км/с, плотность –  $2,029 \pm 0,025$  г/см<sup>3</sup> в высушенном состоянии (4 часа при температуре 110 °С). При насыщении водой в вакууме определялась объемная плотность и, соответственно, пористость –  $20 \pm 1\%$ . Образцы были заключены в термоусадочную трубку для герметизации боковой поверхности.

## Лабораторная установка

Для проведения экспериментов была создана лабораторная установка (рис. 1), которая может попеременно работать в режимах вынужденных и автоколебаний (положения переключателя ВК и АК соответственно) [29, 30]. Акустические колебания

в образце (6) возбуждаются пьезопреобразователем – вибратором 1. В режиме ВК на вибратор поступает линейно-частотно модулированный сигнал (свип) от генератора 7, диапазон частот – 0,7–10 кГц. В режиме АК генератор отключается и замыкается цепь обратной связи с выхода фазовращателя 4 на вход вибратора 1. В экспериментах использовались компьютерно управляемые цифровые генератор и регистратор.

Эксперименты проводились в режиме вынужденных и самоподдерживающихся колебаний (автоколебаний). Регистрировались акустический сигнал с торца образца, электрический отклик образца, снимаемый с закрепленных на нем электродов, и сигнал задающего генератора (входной сигнал вибратора) (рис. 1). Коэффициент усиления усилителя подбирался для сухого образца и затем не изменялся в процессе других измерений с добавлением жидкости.

Для регистрации акустических колебаний использован пьезоэлектрический преобразователь П113-(06–1.0), амплитудно-частотная характери-

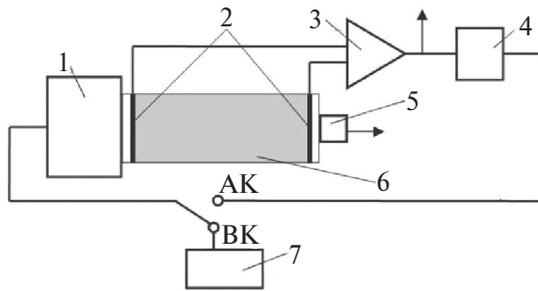


Рисунок 1. Лабораторная установка: 1 – акустический пьезопреобразователь-вибратор; 2 – электроды; 3 – селективный усилитель; 4 – фазовращатель; 5 – акустический приемник; 6 – образец; 7 – генератор свип-сигналов; стрелки – выходы для регистрации акустических и электрических сигналов; АК и ВК – положение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

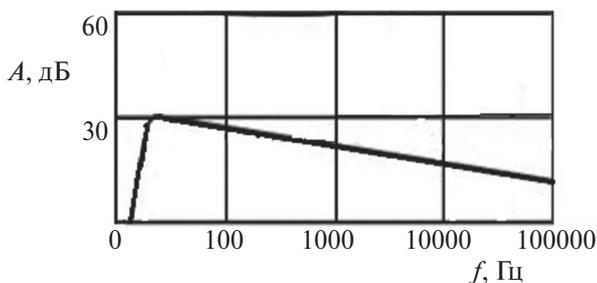


Рисунок 2. Амплитудно-частотная характеристика датчика для регистрации акустических колебаний согласно работе [31]

стика которого показана на рис. 2. Коэффициент преобразования по напряжению –  $18 \pm 0,8$  мВс<sup>2</sup>/м [31].

### Схема эксперимента

При проведении эксперимента установка сначала переключалась в режим вынужденных колебаний (ВК) (рис. 1). Образец сухого керна горной породы помещался в установку. На вход вибратора – пьезоакустического преобразователя подавался свип-сигнал задающего генератора с линейно модулированной в диапазоне 0,7–10 кГц частотой. Вибратор создавал в образце керна продольные акустические колебания, которые регистрировались с другой стороны керна и, после предварительного усиления, записывались на накопителе в цифровом виде непрерывно в течение всего сеанса вибровоздействия. Электрический сигнал в направлении продольных акустических колебаний, возникающий на электродах, также усиливался и записывался на накопитель. Синхронно записывался и сигнал на входе вибратора.

Затем установка переключалась в режим автоколебаний (АК) (рис. 1). Путем регулировки коэффициента усиления электрического сигнала и фазового сдвига в полученном замкнутом контуре добивались баланса амплитуд и баланса фаз, образования положительной обратной связи и, как следствие, возникновения автоколебаний, основанных на механоэлектрических преобразованиях в образце. Сдвиг фаз производился с помощью фазовращателя (рис. 1).

После нескольких часов автоколебаний при помощи шприца прокалывалась термоусадочная пленка на поверхности керна и вводилась жидкость на поверхность образца. Количество жидкости не превышало 0,5 мл, что составляет 1,2% от объема образца и 6% от объема порового пространства керна. Регистрация в режиме автоколебаний продолжалась до момента самопроизвольного изменения частоты колебаний. После этого установка снова переводилась в режим вынужденных колебаний и снова регистрировались акустический и электрический отклики на свип в диапазоне 0,7–10 кГц. Так как происходил скачок частоты автоколебаний, можно считать, что процесс внедрения жидкости в керн развился достаточно, чтобы повлиять на изменения коэффициента механоэлектрических преобразований. В опыте с впрыскиванием керосина, результаты которого описаны далее, скачок частоты автоколебаний произошел через 70 мин. от момента увлажнения образца.

### Методика обработки данных

Для анализа тонкой структуры волновых полей были рассчитаны частотно-временные представления зарегистрированных акустических

и электрических сигналов. При вычислении амплитудных спектров использовалось быстрое преобразование Фурье (FFT) [32] с наложением окна Ханна во временной области (Hanning smoothing window) для уменьшения боковых лепестков спектральной оценки [33]. Для уменьшения дисперсии спектральной оценки было также использовано усреднение по трем соседним окнам с 50%-ным перекрытием сегментов [34].

Пример частотно-временного спектра свип-сигнала от задающего генератора показан на рис. 3а, а соответствующего электрического сигнала – на рис. 4. Как можно видеть, на спектрограммах сигналов присутствуют особенности в виде одной или нескольких ветвей экстремумов, параметры которых и содержат полезную информацию. Для геофизического анализа данных нам необходимо получить явные зависимости от времени амплитуды и частоты для каждой ветви экстремумов. Имея такую информацию, легко получить зависимость амплитуды выбранной ветви экстремумов от частоты.

При наличии одной главной ветви максимумов указанные зависимости получить очень легко. Для каждого временного среза спектрограммы определяется максимум по амплитуде и соответствующая максимуму частота. Примеры таких зависимостей показаны на рис. 3. Как легко заметить (рис. 3в), изменение частоты свипа в нашем эксперименте является ступенчатой функцией

с шагом  $\Delta f_s \sim 0,5$  с по времени и  $\Delta f_s \sim 50$  Гц по частоте. На графике зависимости амплитуд спектра от времени (рис. 3г), с тем же периодом по времени  $\Delta t$  появляются импульсные искажения хода кривой. Эти искажения-всплески являются артефактами при FFT, связанными со скачком частоты, и легко устраняются благодаря использованию медианного фильтра (рис. 3д). Очищенная от артефактов зависимость амплитуды свип-сигнала от частоты воздействия показана на рис. 3б.

Если на спектрограмме присутствует несколько ( $k$ ) ветвей экстремумов, как, например, гармоники на рис. 4, то алгоритм выделения соответствующих функциональных зависимостей несколько усложняется. Для каждого временного среза сначала проводится ранжирование амплитуд по убыванию. Затем выбираются  $k$  первых достаточно удаленных друг от друга максимумов, таких, что частота последующего максимума расположена за пределами  $\epsilon 1_f$  – окрестности предыдущего максимума. По своей сути  $\epsilon 1_f$ -окрестность – это ширина максимума по частоте. В нашем случае мы выбрали  $\epsilon 1_f = 3\Delta f_s$ , то есть равную утроенному шагу частоты свип-сигнала. Таким образом, получаются две матрицы: матрица амплитуд, где на каждом временном интервале заданы  $k$  максимальных значений, и связанная с ней матрица частот.

Однако, как показали эксперименты, соотношение амплитуд для разных ветвей экстремумов изменяются, причем глобальный максимум может

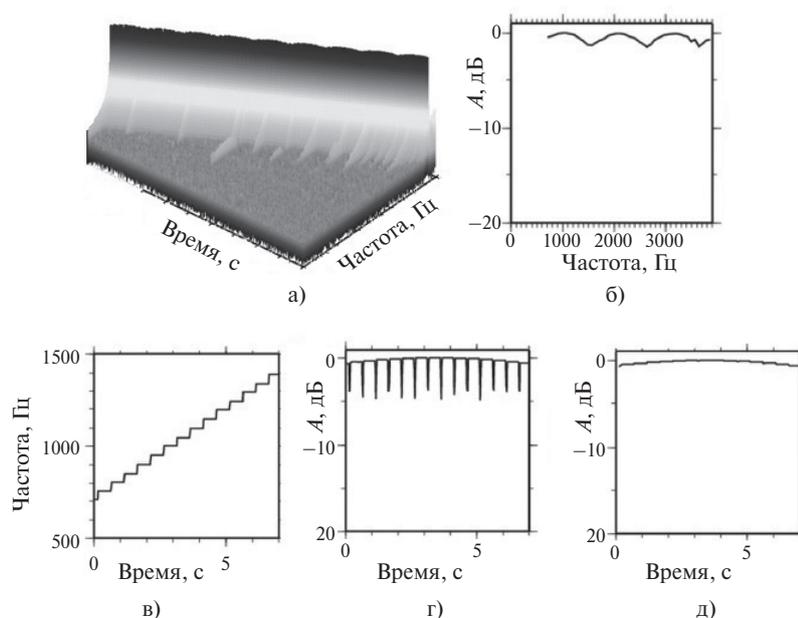


Рисунок 3. Линейно-частотно модулированный сигнал на входе акустического пьезопреобразователя-вибратора: а – частотно-временной амплитудный спектр сигнала; б – очищенная от артефактов зависимость амплитуды сигнала от частоты воздействия; в – зависимость частоты сигнала от времени; г – исходная зависимость амплитуды ветви экстремумов от времени; д – зависимость амплитуды ветви экстремумов от времени после медианной фильтрации с целью очистки от артефактов

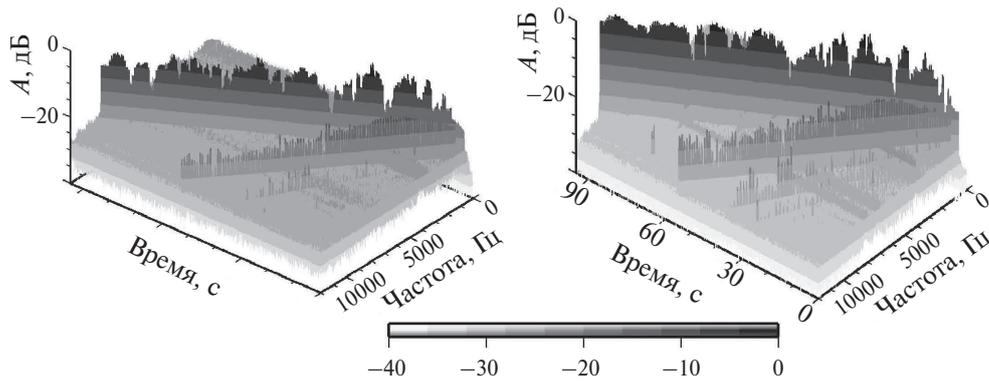


Рисунок 4. Частотно-временные спектры электрического сигнала для керна: слева – сухого, справа – увлажненного керосином. Внизу приведена шкала интенсивности окраски относительно значений амплитуды в дБ

переходить с одной ветви экстремумов на другую. Изменение частоты задающего генератора во времени также имеет незапланированные сбои. Чтобы правильно сформировать функциональные зависимости для всех  $k$  ветвей, необходимо дополнительное ранжирование по частоте. Оно проводится следующим образом. Для каждой ветви, начиная со старшей ветви наибольших максимумов, на каждом последующем интервале времени проверяем приращение частоты. Если оно меньше наперед заданной величины  $\varepsilon 2_f$ , то переходим к анализу следующего интервала времени. Если приращение частоты больше  $\varepsilon 2_f$ , то ищем среди набора частот других ветвей частоту такую, что ее отличие меньше  $\varepsilon 2_f$ . Если такая частота находится, то значения соответствующих элементов матриц двух ветвей меняются местами. Если нужного приращения частоты не находится, то амплитуда зануляется, а частота вычисляется по непрерывности. Для ветви основного сигнала выбрана пороговая величина  $\varepsilon 2_f = 1,2\Delta f_s$ . После перебора всех частот первая ветвь считается сформированной, и переходим к анализу следующей ветви с перебором значений в максимумах оставшихся ветвей. Так как нас интересуют максимумы гармоник основной частоты, то значение порога скачка частот  $\varepsilon 2_f$  при переходе к следующей ветви максимумов пропорционально увеличивается согласно номеру гармоники. Таким образом, для каждой из  $k$  ветвей получаются необходимые функциональные зависимости, аналогичные приведенным на рис. 3.

### Результаты эксперимента

При анализе экспериментальных данных мы имеем дело с зашумленным сигналом. Уровень экологического акустического и электрического фона определяет минимальный уровень амплитуд, до которого ветви экстремумов мы можем надежно

выделять на общем фоне с использованием вышеописанных алгоритмов обработки данных. Для шумовой обстановки описанного эксперимента для сухого керна устойчиво выделялись линии экстремумов с амплитудами более 40 дБ.

Необходимо отметить, что на частотно-временных спектрах как электрических, так и акустических сигналов высшие гармоники визуально просматриваются. Однако уровень амплитуд высших гармоник для акустического сигнала существенно меньше, чем для электрического, менее 40 дБ, что соответствует ослаблению амплитуды более, чем в 100 раз. Поэтому в данном эксперименте анализировались только первые гармоники акустических сигналов. Для электрических сигналов уровень вторых гармоник существенно выше 40 дБ, а на нижних частотах амплитуда второй гармоники даже превышает амплитуду первой.

Зависимости амплитуд акустического и электрического сигналов от частоты воздействия показаны на рис. 5. Следует подчеркнуть, что зависимости представлены как функции частоты воздействия. То есть 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.

Как видно из графиков, приведенных на рис. 5, спектр электрического сигнала сильно изрезан, перепад амплитуд максимумов и минимумов достигает 20 дБ. На частотах менее 5 кГц наблюдается тренд роста значений с ростом частоты, на частотах более 5 кГц среднее значение примерно постоянно. Спектр акустического сигнала имеет более простую и гладкую форму спектра, чем спектр электрического сигнала.

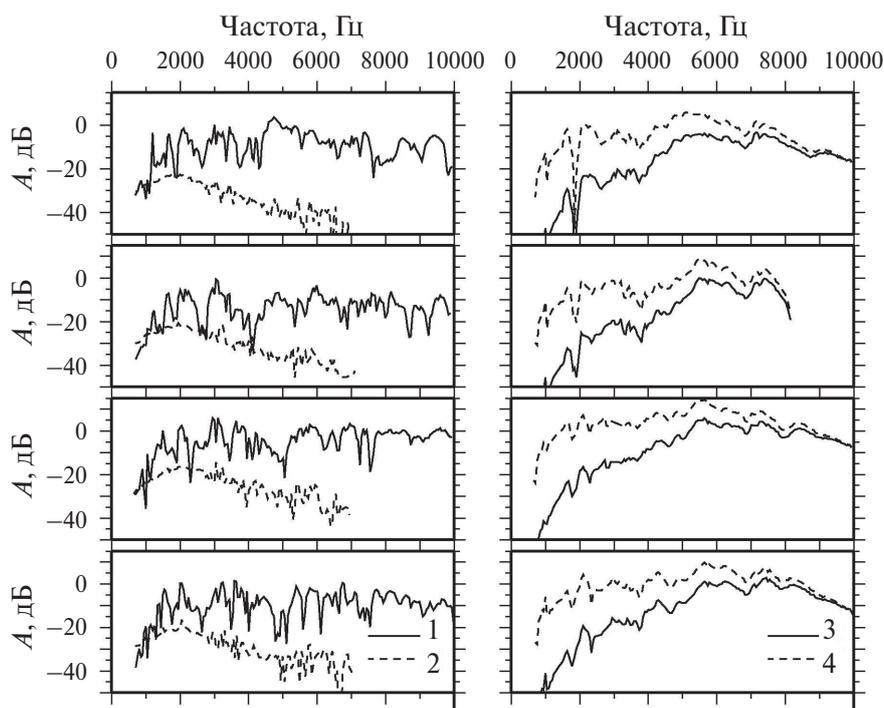


Рисунок 5. Зависимость амплитуд акустического и электрического сигналов от частоты воздействия: первая (1) и вторая (2) гармоники электрического сигнала; исходный сигнал акустического датчика – акселерометра (3), акустический сигнал в пересчете на смещения с поправкой за амплитудно-частотную характеристику прибора (4) (см. рис. 2). Два верхних графика – результаты для сухого керна, разделенные по времени несколькими часами вибрации в режиме автоколебаний. Два нижних графика – результаты для увлажненного керна, разделенные по времени несколькими часами вибрации в режиме автоколебаний. Нормировка – по максимальному сигналу для сухого керна

После добавления небольшого объема керосина форма амплитудного спектра (положение максимумов и минимумов) электрического сигнала сильно изменяется во всем диапазоне частот. При этом в процессе вибрации в режиме автоколебаний продолжительностью в несколько часов форма амплитудного спектра электрического сигнала, отдельно для сухого и увлажненного керна, хорошо сохраняется на частотах 0,7–7 кГц и изменяется на частотах 7–10 кГц.

После добавления керосина форма амплитудного спектра акустического сигнала изменяется незначительно, наибольшие изменения наблюдаются в нижнем диапазоне частот (0,7–5 кГц): уменьшаются по величине и смещаются «амплитудные провалы» в спектре. После продолжительной вибрации в режиме автоколебаний форма амплитудного спектра акустического сигнала хорошо сохраняется во всем диапазоне частот.

В спектре электрического сигнала наблюдается вторая гармоника, которая на частотах 0,7–1,5 кГц сравнима по амплитуде или даже превышает амплитуду первой гармоники. Спектр второй гармоники имеет выпуклую форму с широким максимумом на частоте 2 кГц.

После добавления керосина значение амплитуд спектра первой и второй гармоник электрического сигнала существенно возрастает (рис. 6). Четко и устойчиво проявляется третья гармоника (рис. 4). Для первой гармоники, в зависимости от частоты, амплитуда увеличивается в 2–10 раз (рис. 6). Для второй гармоники наблюдается увеличение амплитуды в 2–3 раза.

### Обсуждение результатов

Приведенные в статье результаты показывают, что механоэлектрические преобразования в малоувлажненных горных породах, что является обычным условием для природного массива, являются существенно нелинейными. Причем генерация второй гармоники электрического поля, в отличие от работ [6–9], наблюдалась в эксперименте без наложения дополнительного внешнего электрического поля.

Использованный нами термин «сухой керн» является условным. В керне содержится остаточная вода. Так как керн высушивался при высокой температуре и был покрыт защитной пленкой, количество воды не должно быть значительным. Однако, так как сейсмозлетрический эффект имеет место,

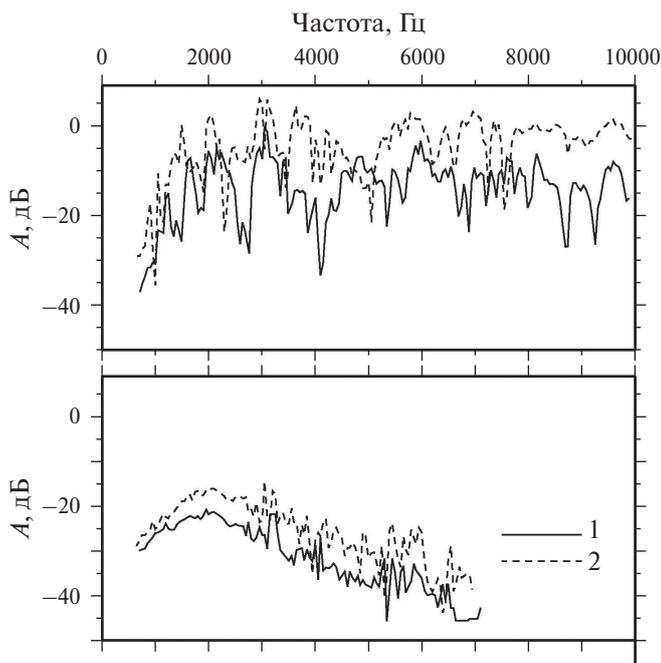


Рисунок 6. Зависимость от частоты воздействия амплитуды первой (вверху) и второй (внизу) гармоники электрического сигнала, для сухого (1) и увлажненного керосином (2) керна

согласно представлениям о механизме трансформации механической формы энергии в электромагнитную форму, вода в керне должна присутствовать. Неожиданным фактом является то, что капельное добавление неполярной жидкости в разы увеличивает амплитуду электрических колебаний, сильно меняет форму амплитудного и фазового [30, 35] спектров.

Возможно, эти эффекты связаны с тем, что внесение в породу небольшого количества флюида создает сильную локальную неоднородность. Наличие такой латеральной сильной неоднородности при вибровоздействии продольной волной создает не только электрический сигнал в продольном направлении, но и поперечный электрический и магнитный сигналы. Индуцированное присутствием локальной неоднородности электромагнитное поле, вероятно, играет такую же роль, что и наложение дополнительного внешнего ортогонального электрического поля, приводя к нелинейным эффектам.

Полученные первые результаты свидетельствуют о необходимости продолжения экспериментальных и теоретических исследований механоэлектрических преобразований в малонасыщенных горных породах и пористых средах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А. Г. Эффект электризации пластов земли при прохождении через них упругих волн // Доклады АН СССР. 1939. № 1. С. 41–43.
2. Светов Б. С. Основы геоэлектрики. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 656 с.
3. Светов Б. С., Губатенко В. П. Электромагнитное поле механоэлектрического происхождения в пористых влагонасыщенных горных породах. Постановка задачи // Физика Земли. 1999. № 10. С. 67–73.
4. Френкель Я. И. К теории сейсмических и сейсмоэлектрических явлений во влажной почве // Известия АН СССР. География и геофизика. 1944. Т. 8. № 4. С. 134–149.
5. Biot M. A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solids. J. Acoustic. Soc. Amer, 1956, vol. 28, pp. 168–186.
6. Черняк Г. Я. Электромагнитные методы в гидрогеологии и инженерной геологии. М.: Недра, 1987. 214 с.
7. Черняк Г. Я. О прямом и обратном сейсмоэлектрических эффектах в осадочных породах при синусоидальном возбуждении // Известия АН СССР. Физика Земли. 1975. № 7. С. 117–121.
8. Черняк Г. Я. О физической природе сейсмоэлектрического эффекта горных пород // Известия АН СССР. Физика Земли. 1976. № 2. С. 108–112.
9. Зейгарник В. А., Ключкин В. Н. Физическое моделирование электросейсмического эффекта в горных породах. Триггерные эффекты в геосистемах // Материалы III Всероссийского семинара-совещания, Москва, 16–19 июня 2015 г. М.: GEOS, С. 252–258.
10. Иванов А. Г. Физика в разведке недр. М.: Недра, 1971. 199 с.
11. Изучение механоэлектрических явлений в сейсмоактивном районе. Физика очага землетрясений / Г. А. Соболев, В. Н. Богаевский, Р. А. Лементуева, Н. И. Мигунов, А. А. Хромов / под ред. М. А. Садовского. М.: Наука, 1975. С. 184–222.
12. Обнаружение и корреляция рудных тел сейсмоэлектрическим методом из штолен. Методика и техника разведки / С. Г. Назарный, В. Г. Радченко, Н. Д. Суворов, В. И. Могильников. Л.: ОНТИ ВИТР, 1975. Вып. 95. С. 28–32.
13. Соболев Г. А., Демин В. М. Механоэлектрические явления в Земле. М.: Наука, 1980. 215 с.
14. Соболев Г. А. Изучение связи электрических и механических явлений в сейсмоактивных районах и на образцах пород в связи с проблемой прогноза землетрясений. М.: ИФЗ РАН, 1968. 120 с.
15. Гохберг М. Б., Гуфельд И. Л., Добровольский И. Л. Источники электромагнитных предвестников землетрясений // Доклады АН СССР. 1980. Т. 250. № 2. С. 323–326.
16. Гохберг М. Б., Моргунов В. А., Похотелов О. А. Сейсмоэлектромагнитные явления / отв. ред. М. А. Садовский. М.: Наука, 1988. 169 с.
17. Яковичкая Г. Е. Электромагнитное излучение и автоколебательный процесс предразрушающего состояния горных пород // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 44–51.

18. Беспалько А. А., Яворович Л. В., Федотов П. И. Связь параметров электромагнитных сигналов с электрическими характеристиками горных пород при акустическом и квазистатическом воздействиях // Известия ТПУ. 2005. Т. 308. № 7. С. 18–23.
19. Хмельевской В. К., Костицын В. И. Основы геофизических методов. Пермь: Пермский ун-т, 2010. 400 с.
20. Воларович М. П., Пархоменко Э. И., Соболев Г. А. Исследование пьезоэлектрического эффекта горных пород в полевых условиях // Доклады АН СССР. 1959. Т. 128. № 3. С. 525–528.
21. Воларович М. П., Соболев Г. А., Пархоменко Э. И. Пьезоэлектрический эффект кварцевых и пегматитовых жил // Известия АН СССР. Серия «Геофизика». 1962. № 2. С. 145–152
22. Соболев Г. А., Демин В. М., Лось В. Ф., Майбук Ю.-З. Я. Возникновение заряда полиметаллических руд в естественных условиях под действием упругой волны // Доклады АН СССР. 1982. Т. 267. № 6. С. 1340–1343.
23. Сочельников В. В., Небрат А. Г. Теоретические оценки сейсмоэлектрического эффекта и его влияние на переходные характеристики становления поля // Известия АН СССР. Геофизика. 1997. № 2. С. 28–38.
24. Чеботарева И. Я. Методы пассивного исследования геологической среды с использованием сейсмического шума // Акустический журнал. 2011. Т. 57. № 6. С. 844–853.
25. Чеботарева И. Я. Трассировка лучей в методе сейсмической эмиссионной томографии // Радиопромышленность. 2017. № 1. С. 19–25.
26. Чеботарева И. Я., Володин И. А. Образы процесса гидроразрыва пласта в сейсмическом шуме // Доклады РАН. 2012. Т. 444. № 2. С. 202–207.
27. Чеботарева И. Я. Мониторинг слабых эндогенных источников сейсмической эмиссии в присутствии интенсивных техногенных помех [Электронный ресурс] // Ученые записки физического факультета Московского университета 2014. № 6. С. 146310-1 – 146310-8. URL: <http://uzmu.2phys.sunmarket.com>
28. Чеботарева И. Я., Володин И. А., Дрягин В. В. Акустические эффекты при деформировании структурно неоднородных сред // Акустический журнал. 2017. Т. 63. № 1. С. 84–93.
29. Kamshilin A. N., Volkova E. N., Kuzichkin O. R., Sokolnikov M. A. Self-oscillations in rocks, results of laboratory experiments. *Annals of geophysics*, 2004, vol. 47, no. 1, pp. 93–100.
30. Камшилин А. Н., Казначеев П. А. Флюиды как управляющий параметр механоэлектрических колебаний. Триггерные эффекты в геосистемах // Материалы III Всероссийского семинара-совещания. Москва, 16–19 июня 2015 г. М.: ГЕОС, 2015. С. 273–278.
31. Пилипенко Ю. Н., Дякун Р. А. Геофизический контроль трещинообразования при разрушении флюидонасыщенного угля и горных пород. Геотехническая механика: межведомственный сборник научных трудов. Днепропетровск: ИГТМ НАНУ. 2012. Вып. 104. С. 69–81.
32. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978. 847 с.
33. Marple S. *Digital Spectral Analysis with Applications*. Englewood Cliffs, N.J. Prentice-Hall, 1987, 492 p.
34. Welch P. D. The use of Fast Fourier Transformation for the estimation of power spectra: based on time averaging over short modified periodograms. *IEEE Trans. Audio and Electroacoustics*, 1967, AU-15, pp. 70–79.
35. Агеева О. А. Использование сейсмоэлектрических преобразований в породах для прогнозирования характера насыщения порового пространства // Геофизика. 2008. № 1. С. 16–21.

## REFERENCES

1. Ivanov A. G. Effect of earth strata elecricization by electric waves passing through them. *Doklady AN SSSR*, 1939, no. 1, pp. 41–43 (In Russian).
2. Svetov B. S. *Osnovy geoelektriki* [Fundamentals of geoelectrics]. Moscow, Izd-vo LKI Publ., 2008, 656 p. (In Russian).
3. Svetov B. S., Gubatenko V. P. Electromagnetic field of mechanoelectric origin in porous moisture-saturated rocks. Objective setting. *Fizika Zemli*, 1999, no. 1, pp. 67–73 (In Russian).
4. Frenkel Ya. I. To the theory of seismic and seismoelectric phenomena in moist soil. *Izvestiya AN SSSR. Geografiya i geofizika*, 1944, vol. 8, no. 4, pp. 134–149 (In Russian).
5. Biot M. A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solids. *J. Acoustic. Soc. Amer*, 1956, vol. 28, pp. 168–186.
6. Chernyak G. Ya. *Jelektromagnitnye metody v gidrogeologii i inzhenernoj geologii* [Electromagnetic methods in hydrogeology and engineering geology]. Moscow, Nedra Publ., 1987, 214 p. (In Russian).
7. Chernyak G. Ya. On direct and reverse seismoelectric effects in sedimentary rocks in case of sinusoidal excitation. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli*, 1975, no. 7, pp. 117–121 (In Russian).
8. Chernyyak G. Ya. On the physical nature of the seismoelectric effect of rocks. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli*, 1976, no. 2, pp. 108–112 (In Russian).
9. Zeygarnik V. A., Klyuchkin V. N. Physical modeling of the electroseismic effect in rocks. Trigger effects in geosystems. *Materialy III Vserossiyskogo seminara-soveshaniya*, Moscow, 16–19 iyunya 2015 g. (In Russian).
10. Ivanov A. G. *Fizika v razvedke nedr* [Physics in the exploration of mineral resources]. Moscow, Nedra Publ., 1971, 199 p. (In Russian).
11. Sobelev G. A., Bogaevskiy V. N., Lementueva R. A., Migunov N. I., Khromov A. A. *Izuchenie mehanojelektricheskikh javlenij v sejsmoaktivnom rajone. Fizika ochaga zemletrjasenij* [Study of mechanoelectric phenomena in a seismically active region. Physics of the source of earthquakes]. In: M. A. Sadovskiy, ed. Moscow, Nauka Publ., 1975, pp. 184–222 (In Russian).
12. Nazarny S. G., Radchenko V. G., Suvorov N. D., Mogilnikov V. I. *Obnaruzhenie i korreljacija rudnyh tel sejsmojelektricheskim metodom iz shtolen. Metodika i tehnika razvedki* [Detection and correlation of ore bodies by seismoelectric method from mine galleries. Methods and techniques of exploration]. Leningrad, ONTI VITR, 1975, iss. 95, pp. 28–32 (In Russian).

13. Sobolev G. A., Demin V. M. *Mehanojelektricheskie javleniya v Zemle* [Mechanoelectric phenomena in the Earth]. Moscow, Nauka Publ., 1980, 215 p. (In Russian).
14. Sobolev G. A. *Izuchenie svyazi jelektricheskikh i mehanicheskikh javlenij v sejsmoaktivnykh rajonakh i na obrazцах porod v svyazi s problemoj prognoza zemletrjasenij* [Study of the connection between electrical and mechanical phenomena in seismically active regions and on rock samples in connection with the problem of the forecast of earthquakes]. Moscow, IFZ RAN, 1968, 120 p. (In Russian).
15. Gokhberg M. B., Gufeld I. L., Dobrovolskiy I. L. Sources of electromagnetic earthquake precursors. *Doklady AN SSSR*, 198, vol. 250, no. 2, pp. 323–326 (In Russian).
16. Gokhberg M. B., Morgunov V. A., Pokhotelov O. A. *Sejsmojelektromagnitnye javleniya* [Seismoelectromagnetic phenomena]. In: M. A. Sadovskiy. Moscow, Nauka Publ., 1988, 169 p. (In Russian).
17. Yakovitskaya G. E. Electromagnetic radiation and autooscillatory process of the pre-destructive state of rocks. *Vulkanologiya i seysmologiya*, 2006, no. 6, pp. 44–51 (In Russian).
18. Bepalko A. A., Yavorovich L. V., Fedotov P. I. Relationship between the parameters of electromagnetic signals and the electrical characteristics of rocks under acoustic and quasistatic influences. *Izvestiya TPU*, 2005, vol. 308, no. 7, pp. 18–23 (In Russian).
19. Khmelevskoy V. K., Kostitsyn V. I. *Osnovy geofizicheskikh metodov* [Basis of geophysical methods]. Perm, Permskiy un-t, 2010, 400 p. (In Russian).
20. Volarovich M. P., Parkhomenko Ye. I., Sobolev G. Investigation of the piezoelectric effect of rocks in the field. *Doklady AN SSSR*, 1959, vol. 128, no. 3, pp. 525–528 (In Russian).
21. Volarovich M. P., Sobolev G. A., Parkhomenko Ye. I. Piezoelectric effect of quartz and pegmatite veins. *Izvestiya AN SSSR. Geofizika*, 1962, no. 2, pp. 145–152 (In Russian).
22. Sobolev G. A., Demin V. M., Los V. F., Maybuk Yu.-Z. Ya. The appearance of a charge of polymetallic ores under natural conditions under the action of an elastic wave. *Doklady AN SSSR*. 1982, vol. 267, no. 6, pp. 1340–1343.
23. Sochel'nikov V. V., Nebrat A. G. Theoretical estimates of the seismoelectric effect and its effect on the transient characteristics of the field formation. *Izvestiya AN SSSR. Geofizika*, 1997, no. 2, pp. 28–38 (In Russian).
24. Chebotareva I. Ya. Methods of passive exploration of the geological environment with the use of seismic noise. *Akusticheskii zhurnal*, 2011, vol. 57, no. 6, pp. 844–853 (In Russian).
25. Chebotareva I. Ya. Ray tracing in the method of seismic emission tomography. *Radiopromyshlennost*, 2017, no. 1, pp. 19–25 (In Russian).
26. Chebotareva I. Ya., Volodin I. A. Characteristics of the hydraulic fracturing process in seismic noise. *Doklady RAN*, 2012, vol. 444, no. 2, pp. 202–207 (In Russian).
27. Chebotareva I. Ya. [Monitoring of weak endogenous sources of seismic emission in the presence of intense technogenic interferences]. *Uchenye zapiski Fizicheskogo fakulteta Moskovskogo universiteta*, 2014, no. 6, pp. 146310-1 – 146310-8 (In Russian). Available at: <http://uzmu.2phys.sunmarket.com>
28. Chebotareva I. Ya., Volodin I. A., Dryagin V. V. Acoustic effects in deformation of structurally inhomogeneous media. *Akusticheskii zhurnal*, 2017, vol. 63, no. 1, pp. 84–93 (In Russian).
29. Kamshilin A. N., Volkova E. N., Kuzichkin O. R., Sokolnikov M. A. Self-oscillations in rocks, results of laboratory experiments. *Annals of geophysics*, 2004, vol. 47, no. 1, pp. 93–100 (In Russian).
30. Kamshilin A. N., Kaznacheev P. A. *Fizuidy kak upravljajushij parametr mehanoelektricheskikh kolebanij. Triggernye jeffekty v geosistemah* [Fluids as a controlling parameter of mechanoelectric oscillations. Trigger effects in geosystems]. *Materialy III Vserossiyskogo seminara-soveshchaniya*. Moskva, 16–19 iyunya 2015 g. Moscow, GEOS, 2015, pp. 273–278 (In Russian).
31. Pilipenko Yu. N., Dyakun R. A. Geophysical monitoring of crack formation in the destruction of fluid-saturated coal and rocks. Geotechnical mechanics. *Mezhvedomstvennyy sbornik nauchnykh trudov*. Dnepropetrovsk, IGTM NANU, 2012, iss. 104, pp. 69–81 (In Russian).
32. Rabiner L., Gould B. *Teorija i primeneniye cifrovoj obrabotki signalov* [Theory and application of digital signal processing]. Moscow, Mir Publ., 1978, 847 p. (In Russian).
33. Marple S. *Digital Spectral Analysis with Applications*. Englewood Cliffs, N. J. Prentice-Hall, 1987, 492 p.
34. Welch P. D. The use of Fast Fourier Transformation for the estimation of power spectra: based on time averaging over short modified periodograms. *IEEE Trans. Audio and Electroacoustics*, 1967, AU-15, pp. 70–79.
35. Ageeva O. A. Use of seismoelectric transformations in rocks to predict the nature of saturation of pore space. *Geofizika*, 2008, no. 1, pp. 16–21 (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Чеботарева Ирина Яковлевна**, доктор физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3, тел.: 8 (917) 585-81-13, e-mail: irinache@inbox.ru.

**Камшилин Анатолий Николаевич**, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли РАН, 123242, Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1, тел.: 8 (963) 615-28-81, e-mail: kamshilin@ifz.ru.

## AUTHORS

**Chebotareva Irina**, Dr., chief scientific researcher, Oil and Gas Research Institute RAS, 3, ulitsa Gubkina, Moscow, 119333, Russian Federation, tel.: +7 (917) 585-81-13, e-mail: irinache@inbox.ru.

**Kamshilin Anatoliy**, PhD, leading scientific researcher, Institute of Physics of the Earth RAS, 10/1, Bolshaya Gruzinskaya ulitsa, Moscow, 123242, Russian Federation, tel.: +7 (963) 615-28-81, e-mail: kamshilin@ifz.ru.