



## О СВЯЗИ СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА 1-го РОДА С ПЕТРОФИЗИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ СРЕДЫ

В. В. Филатов, В. Н. Савинов, О. Ю. Светозерский

На основе результатов физического моделирования на образцах горных пород исследованы проявления сейсмоэлектрического эффекта первого рода. При этом основное внимание уделено изучению непосредственно процессов спада и релаксации удельного сопротивления вследствие упругого воздействия на образец. При акустическом возбуждении в килогерцовом диапазоне имеет место явление параметрического резонанса, обуславливающее нелинейную реакцию среды на такое возбуждение. Установлены зависимости между характеристиками сейсмоэлектрического эффекта и такими параметрами, как пористость, трещиноватость и интервальные скорости пробега продольных и поперечных волн. Отмечена связь амплитуды сейсмоэлектрического эффекта первого рода с литологическими характеристиками горных пород. Это позволяет рассматривать интенсивность сейсмоэлектрического эффекта как количественную характеристику при изучении коллекторских свойств среды.

**Ключевые слова:** сейсмоэлектрический эффект, горные породы, физические свойства, коллекторские свойства, литологические характеристики.

## ON ASSOCIATION OF THE 1<sup>ST</sup> KIND SEISMIC-ELECTRIC EFFECT AND PETROPHYSICAL PARAMETERS OF MEDIUM

V. V. Filatov, V. N. Savinov, O. Yu. Svetozerskiy

Manifestations of the first-order seismic-electric effect are investigated based on the results of rock samples physical modeling. The main attention was directly paid to studying processes of resistivity drop and relaxation resulting from elastic impact on a sample. It is noted that a parametrical resonance phenomenon causing a nonlinear response of the medium to acoustic excitement at different kilohertz frequencies takes place. Interrelation between seismic-electric effect characteristics and such parameters as porosity, jointing, and interval longitudinal and transverse velocities is established. It is noted that the first-order seismic-electric effect amplitude is connected with rock characters. It allows considering the intensity of seismic-electric effect as a quantitative characteristic in studying reservoir properties of the environment.

**Keywords:** seismic-electric effect, rocks, physical properties, reservoir properties, rock characters.

Прогресс в геофизической разведке, как правило, зависит от установления новых связей параметров среды с геофизическими полями и развитием на этой основе новых геофизических методов.

Отмеченное в 1936 г. в работе [13] изменение электрического сопротивления горных пород под действием упругих колебаний (сейсмоэлектрический эффект 1-го рода) и открытие А. Г. Ивановым [3] в 1939 г. сейсмоэлектрического эффекта 2-го рода, создали предпосылки для получения качественно новой информации при геофизических исследованиях. Это базируется как на специфической кинематической картине данных явлений, так и на тесной связи локальных зон интенсивных механоэлектрических преобразований с петрофизическими свойствами геологической среды. Дело в том, что сейсмоэлектроразведка наряду с немногими электроразведочными методами не относится к методу сопротивлений. В основе ее лежат совсем иные принципы, что позволяет существенно дополнить и уточнить результаты, получаемые с помощью как электро-, так и сейсморазведки.

До настоящего времени методы сейсмоэлектроразведки не нашли широкого применения в практике геофизических работ. Одна из причин этого – сложность теории и многофакторность мо-

дели. Решение проблем математического моделирования и комплексной обработки данных с переходом на микрофизический уровень осреднения моделей все еще актуально в задачах одновременного применения различных полей для более устойчивого (и точного) решения прямых и обратных задачи геофизики.

Исследования по вопросам сейсмоэлектро-разведки в основном касаются сейсмоэлектрического эффекта 2-го рода (сейсмоэлектрической конверсии), основы теории которого для горизонтально-однородной среды были развиты С. Прайдом, Я. Френкелем и Б. С. Световым [10, 12, 19]. Эффект не отличается большой глубиной и величиной, что существенно ограничивает область его применения.

Сейсмоэлектрический эффект 1-го рода (СЭЭ1) обладает существенно большей глубиной проникновения в геологическую среду; эта глубина не всегда адекватна мощности примененного источника. Кроме того, характерной чертой эффекта 1-го рода является длительное время релаксации, а иногда и необратимый процесс преобразования среды. Столь сильный и длительный процесс характерен для трещиноватых малопористых коллекторов преимущественно карбонатного состава.



Отметим, что в определенной «линейной» постановке СЭЭ1 можно связать с сейсмoeлектрическим эффектом 2-го рода [8]. Но эксперименты свидетельствуют о наличии явной нелинейной составляющей, которая не описывается существующей теорией. Нелинейность реакции среды – обычно следствие наличия зон энергетической неустойчивости и напряженности. Повышенная глубинность СЭЭ1 объясняется эстафетным процессом образования трещин в жестких кристаллических породах [2] и так называемым триггерным эффектом, т.е. способностью горной породы, находящейся в состоянии энергетической неустойчивости, самовозбуждаться и менять свои параметры под действием сравнительно слабого сигнала [5].

В такой постановке проявление СЭЭ1 и его связь с параметрами среды плохо предсказуемы. Однако результаты физического моделирования и отдельных полевых экспериментов свидетельствуют о том, что такие связи существуют.

В данной работе рассмотрены два вопроса:

1. Проявление нелинейности в реакции горной породы на приложенное возбуждение.
2. Возможность использования СЭЭ1 для прогноза петрофизических характеристик горной породы.

### О нелинейности СЭЭ1

Классическая электроразведка основана на модели электромагнитных полей, представленных уравнениями Максвелла. Уравнения замыкаются соотношением между электрическим полем и плотностью тока (закон Ома), а также линейной материальной связью электрической индукции с электрическим полем. Именно по уравнениям Максвелла с помощью измеренных характеристик электромагнитного поля определяются электропроводность и диэлектрическая проницаемость среды. На основе знания этих параметров можно делать косвенные выводы о петрофизических характеристиках георазрезов.

Но в уравнениях Максвелла не учитываются проницаемость среды, ее пористость, потенциал двойного электрического слоя и т.д., хотя это позволило бы совершенно по-новому взглянуть на свойства электромагнитного поля и процесс его распространения.

Надо признать, что в настоящее время практически отсутствует последовательная «микроскопическая» электродинамическая теория пористых поляризующихся сред, что не позволяет адекватно рассмотреть и сейсмoeлектрические эффекты.

Впервые такие эффекты теоретически рассмотрены в работе Я. И. Френкеля [12]. Значительно более продвинута теория С. Прайда [19]. В ее основе лежат линеаризованные уравнения электродинамики, а также линеаризованные гидроди-

намические уравнения движения пористой матрицы и жидкости в ней.

Но нелинейные эффекты (например, эффекты появления аномальной дисперсии влагонасыщенных сред в килогерцовом диапазоне) не описываются не только системами уравнений, предложенными в работах С. Прайда, Я. Френкеля, но и последующими более развитыми системами [4, 14, 15].

В то же время нелинейность проявления СЭЭ1 отмечается не только в полевых экспериментах, где, как уже отмечалось, она может быть объяснена энергетической неустойчивостью среды, но и при проведении физического моделирования на образцах горных пород. Рассмотрим это на конкретных примерах.

Были выполнены измерения СЭЭ1 на группе образцов, в состав которых входили образцы с межзерновой пористостью, а также с трещинно-поровым, трещинно-каверново-поровым и трещинно-порово-каверновым типами пористого пространства. Породы были представлены песчаниками, доломитами и известняками, имеющими преимущественно очень сложное строение пустотного пространства.

Здесь необходимо остановиться на процедуре обработки результатов наблюдений. Следует обратить внимание на то, что в ранее проведенных исследованиях основное внимание обращалось на факт наличия или отсутствия СЭЭ1, а сам эффект характеризовался амплитудой, т.е. разницей между удельным сопротивлением до и после упругого воздействия.

Из анализа результатов петрофизических исследований с очевидностью следует, что полная амплитуда СЭЭ1 – одна из объективных характеристик породы, и следовательно, точность его измерения может играть существенную роль. Но так же очевидно, что принимать за амплитуду СЭЭ1 отличие сопротивления в начале и в конце воздействия не совсем корректно. По-видимому, можно считать, что процесс изменения сопротивления прекращается, когда сопротивление достигает определенного порога «насыщения», после которого изменения становятся незначительными. Очень часто процесс изменения еще не закончен, и фактически измеренная амплитуда может существенно отличаться от искомой характеристики (рис. 1). Можно утверждать, что значительная часть экспериментальных кривых является незавершенной. Кроме того, амплитуд СЭЭ1 в таком виде, по-видимому, недостаточно для характеристики породы. Анализ кривых показывает, что даже для близких по петрофизическим свойствам образцов измеренные амплитуды и длительности процессов могут значительно различаться. При этом, несмотря на то что длительная релаксация сопротивления неоднократно регистрировалась, сами процессы релаксации практически не исследовались, так как еще не определены фак-



торы, обуславливающие характер и длительность таких процессов.

В работе [2] отмечено, что изменения горных пород в результате упругого воздействия возникают вследствие процессов «самоорганизации» трещиноватости горной породы в условиях сложного напряженно-деформированного состояния геологической среды. Или, если рассматривать несколько более общую постановку, в результате «самоорганизации» путей переноса флюида во фрактальной среде.

Можно считать, что сейсмoeлектрические эффекты в той или иной мере представляют собой отражение подобных процессов самоорганизации. Тогда следует заметить, что простой экспоненциальный закон и классическая модель броуновской диффузии не могут описать релаксационные явления и кинетику в таких сложных самоорганизующихся системах. Здесь характерны не экспоненциальное поведение релаксации и аномальная диффузия – явления, которые определяются термином «странная кинетика» [21]. Одна из возможных моделей для описания процесса релаксации в неупорядоченных структурах предложена, например, в работе [18], где рассматриваемая среда представляется в виде иерархически организованной совокупности кластеров.

В такой системе временно́е уравнение релаксации, в соответствии с которым должно изменяться сопротивление,

$$\frac{d\rho(t)}{dt} + \lambda\rho(t) = 0$$

сводится к уравнению аномальной (сверхмедленной) релаксации [6, 7]

$$\frac{d^{\nu}\rho(t)}{dt^{\nu}} + \lambda\rho(t) = 0, \quad 0 < \nu < 1. \quad (1)$$

Здесь  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление,  $\lambda$  – коэффициент определяющий время релаксации.

С точки зрения физики это уравнение описывает движение к положению равновесия, когда в процесс потери энергии вовлечена только часть состояний физической системы, определяемая фрактальной размерностью  $\nu$  [7].

Решение уравнения сверхмедленной релаксации может быть выражено с помощью функций Миттаг-Леффлера  $e_{\nu}(t)$  [6, 9]:

$$e_{\nu}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{(\lambda t^{\nu})^n}{\Gamma(\nu n + 1)}, \quad t > 0, \quad 0 < \nu \leq 1.$$

Здесь  $\Gamma$  – гамма-функция Эйлера.

Для того чтобы понять, как ведет себя такое решение, отметим, что одно из асимптотических приближений функции Миттаг-Леффлера имеет вид экспоненциального закона Кольрауша – Уилямса – Уоттса [16, 22]

$$e_{\nu} \sim \exp\left[-\frac{\lambda t^{\nu}}{\Gamma(1+\nu)}\right],$$

т. е. экспоненты, в которой показатель имеет степень меньше единицы, что существенно замедляет скорость спада. При этом скорость спада определяется уже не только величиной  $\lambda$ , но и показателем  $\nu$ , определяемым фрактальной размерностью и тесно связанным со структурными особенностями среды.

Практически все кривые изменения сопротивления, полученные в ходе физического моделирования сейсмoeлектрического эффекта на различных образцах горных пород, с хорошей точностью аппроксимируются функциями Миттаг-Леффлера, вычисление которых проводилось по алгоритму из работы [20].

Рассмотрим характерный пример такой кривой (рис. 2). Начальное время соответствует началу упругого воздействия. На рис. 2 отображены две стадии процесса. Первая характеризует изменение сопротивления в процессе упругого воздействия, вторая описывает собственно процесс релаксации. Сплошная линия – график функции Миттаг-Леффлера.

Такая аппроксимация позволяет в случае необходимости сглаживать и экстраполировать кривые изменения сопротивления и более адекватно сравнивать между собой амплитуду СЭЭ1 при различных наблюдениях.

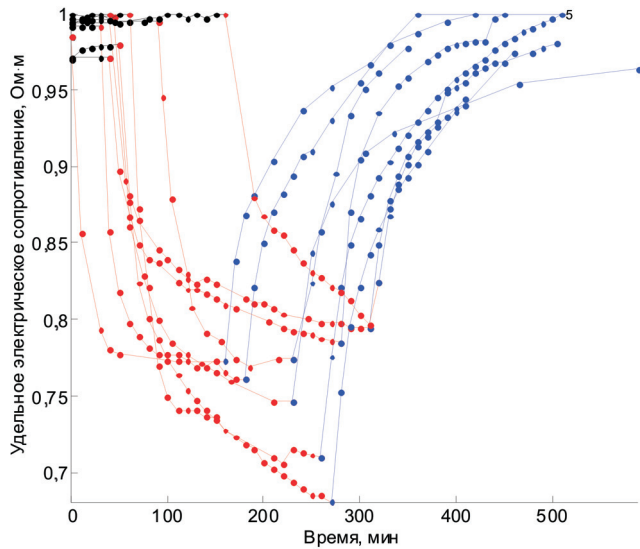
Кроме того известно, что для систем, поведение которых описывается уравнением сверхмедленной релаксации типа (1), реакция на гармоническое ( $e^{i\omega t}$ ) возбуждение характеризуется комплексной восприимчивостью  $\chi(\omega)$ , определяющей частотную дисперсию решения и имеющей вид [7]:

$$\chi(\omega) = \frac{\chi(0)}{[1 + (i\omega B_{\lambda})^{\nu}]},$$

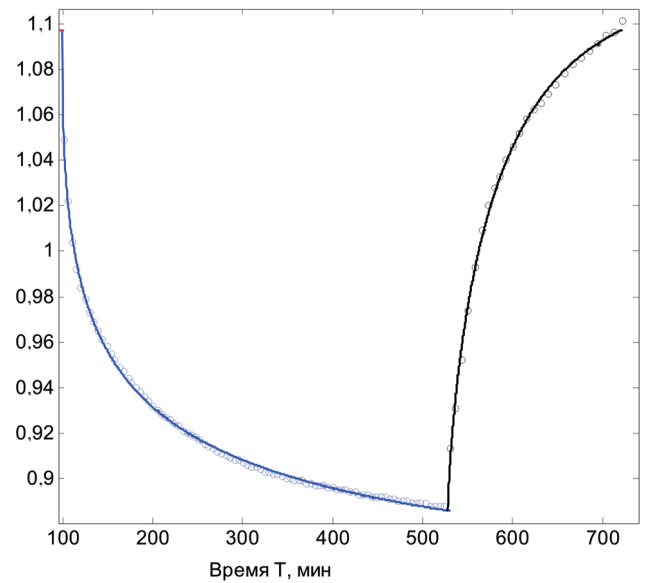
аналогичный известному соотношению Cole-Cole. Здесь  $B_{\lambda}$  – константа, зависящая от коэффициента уравнения (1).

Параметры подобных соотношений тесно связаны с петрофизическими характеристиками среды, что широко используется, например, в электро-разведке [17].

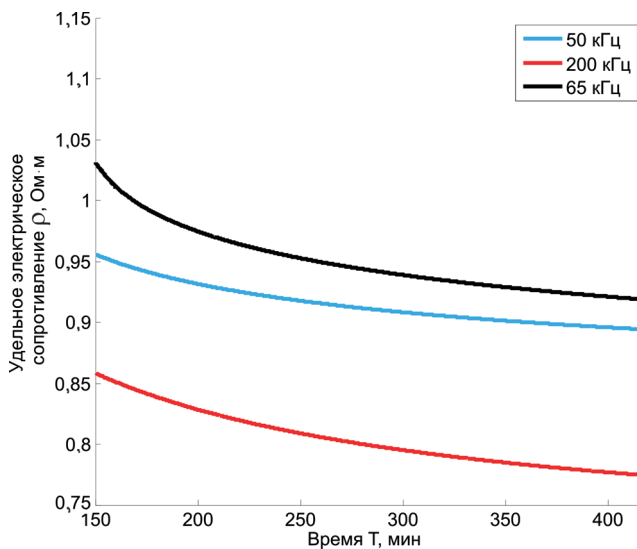
Анализ результатов измерений на различных частотах акустического поля показал, что величина  $\nu$ , определяющая дробный порядок уравнения (1) и характер изменения удельного сопротивления, зависит не только от свойств среды, но и от частоты акустического возбуждающего поля. На рис. 3 показаны графики функций Миттаг-Леффлера, аппроксимирующие кривые спада сопротивления, полученные при разных частотах на одном образце. Виден различный характер спада. Показатель  $\nu$  для частоты 50 кГц равен 0,44, для частоты 65 кГц – 0,59, 200 кГц – 0,32.



**Рис. 1.** Измерение СЭЭ1 на группе образцов (черный – сопротивление до упругого воздействия, красный – во время воздействия, синий – после воздействия)



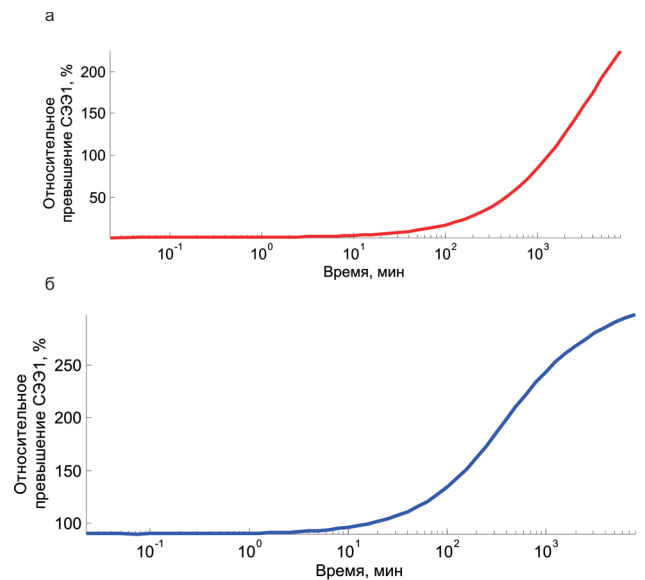
**Рис. 2.** Аппроксимация измеренных значений (кружки) кривых спада и релаксации сопротивления функциями Mittag-Леффлера (сплошные линии)



**Рис. 3.** Графики функций Mittag-Леффлера, аппроксимирующие кривые спада сопротивления, полученные при разных частотах механического воздействия на одном образце

Различие графиков в зависимости от такого достаточно абстрактного параметра, как дробная размерность, хорошо согласуется с реально наблюдаемыми характеристиками СЭЭ1.

Отметим, что сейсмoeлектрический эффект 1-го рода различной амплитуды был зафиксирован практически во всех исследованных образцах. При этом в измерениях при разных частотах упругого воздействия отмечено, что амплитуда СЭЭ1, измеренная на частоте 65 кГц, превышала (на ряде образцов очень существенно) аналогичные результаты на других частотах, как меньших, так и превышающих 65 кГц, т.е. был отмечен своего рода параметрический резонанс. На рис. 4 показаны примеры кривых превышения амплитуды изменения удельного сопротивления (СЭЭ1).



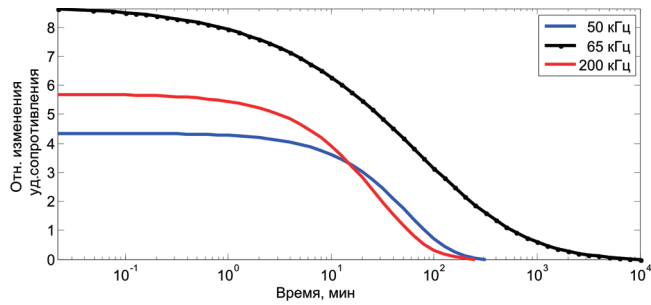
**Рис. 4.** Относительное превышение амплитуды изменения удельного сопротивления образца на частоте 65 кГц по сравнению с измерениями на частоте 50 кГц (а) и на частоте 200 кГц (б)

Заметим, что увеличение СЭЭ1 фактически означает многократный рост акустического поля в образце при неизменной мощности акустического источника.

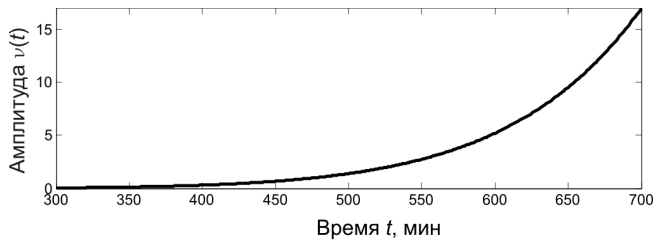
Очевидно, что такие изменения удельного сопротивления в процессе наблюдения СЭЭ1 не вписываются в стандартную частотную дисперсию типа Cole-Cole.

При этом изменения сопротивления при частоте упругого воздействия 65 кГц отличаются не только более высокой амплитудой СЭЭ1, но большей длительностью процесса изменения сопротивления. На рис. 5 показаны сравнительные длительности процессов, наблюдаемых при различных частотах акустического поля. В качестве критерия конца процесса взято уменьшение скорости изме-





**Рис. 5.** Сравнительные характеристики длительности процесса спада сопротивления при упругом воздействии на частотах 50, 65 и 200 кГц



**Рис. 6.** Огибающая, характеризующая эволюцию во времени амплитуды функции  $v(t)$

нения сопротивления до определенной величины (выполживание кривой).

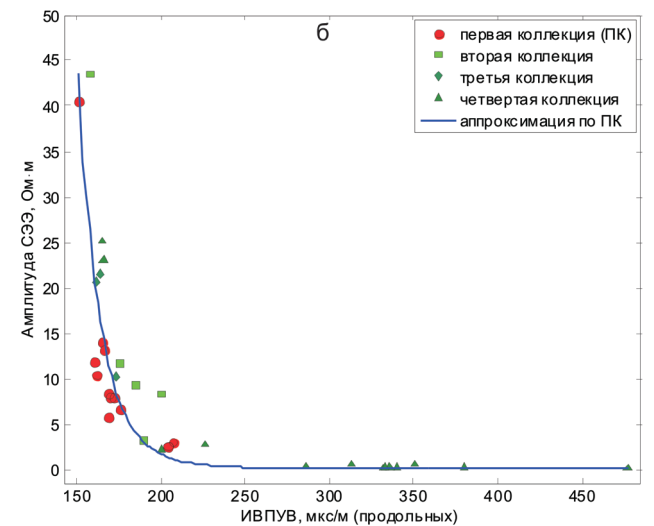
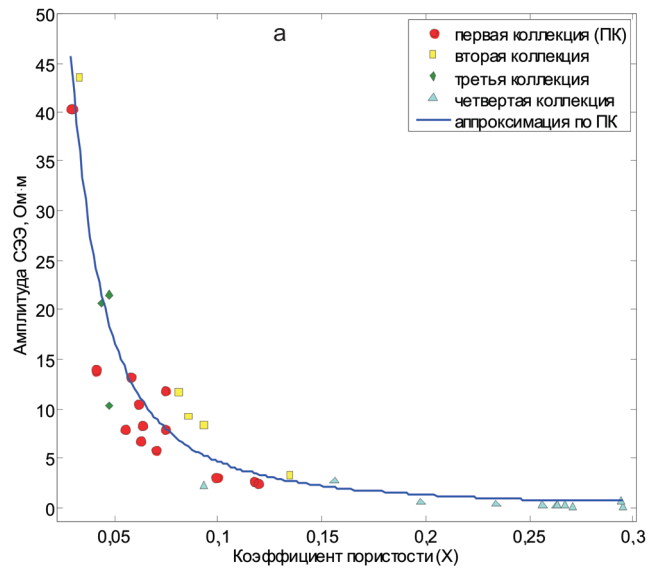
Объяснять это явление можно по-разному, связав его, например, с величиной образца. Но обратимся к недавно сформировавшемуся подходу к теории электромагнитного поля, основанному на построении электродинамики флюидонасыщенных пористых сред. Этот подход базируется на двух-скоростной теории пороупругости в пористых насыщенных флюидами средах, взаимодействующих с электромагнитным полем через механизм поляризации среды. Такая теория позволяет по-новому взглянуть на сейсмoeлектрические эффекты, возникающие в горных породах, в частности, на некоторые особенности проявления таких эффектов, отмечаемые в экспериментах.

Например, в работах [1, 14, 15] показано, что в системах уравнений, описывающих слоистые водонефтяные структуры, появление только одного дополнительного фактора, зависящего от наличия в структуре небольшого количества газа, на определенных частотах приводит к параметрическому возбуждению системы при периодическом воздействии на нее упругими колебаниями малой амплитуды. В работе [1] были исследованы колебания макроскопического слоя, обусловленные малым внешним воздействием со стороны открытой поверхности.

При некоторых условиях график колебаний  $v(t)$  имеет вид осциллирующей функции с экспоненциально возрастающей амплитудой (рис. 6). При этом амплитуда начального возмущения имела вид

$$v|_{t=0} = 0,001 \cos(\pi x) \sin(\pi x).$$

Экспериментальными исследованиями уже давно показана возможность стимуляции добычи



**Рис. 7.** Связь амплитуды СЭЭ1 с коэффициентом пористости (а) и интервальным временем пробега продольных упругих волн (ИВПУВ) (б)

нефти сейсмическим полем малой интенсивности. При этом в целом ряде работ предполагалось, что изменение свойств продуктивного пласта происходит за счет внутренней энергии, активизируемой внешним воздействием. В работе [1] с помощью рассмотренной модели объясняется разрушение водонефтяных пленок в трещинах при акустических воздействиях, что и стимулирует выход нефти с полярными компонентами и газом. Но очевидно, что в общем случае резонансные явления могут приводить к существенным изменениям параметров флюидонасыщенной среды, обуславливающим СЭЭ1.

Таким образом, и результаты физического моделирования, и теоретические расчеты показывают возможность неадекватной реакции среды на упругое воздействие за счет возникновения параметрического резонанса.

### О прогнозе петрофизических свойств

Теоретические исследования электрокинетических явлений, в частности сейсмoeлектрических эф-

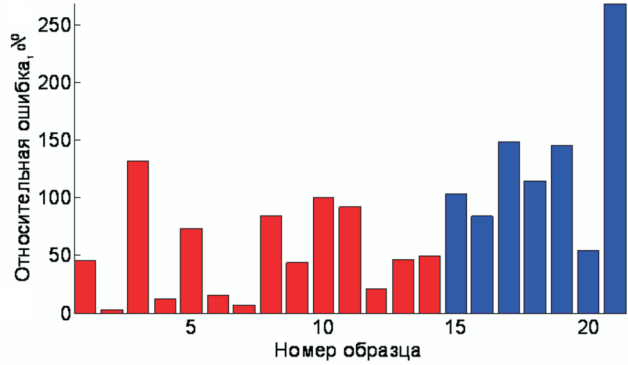


Рис. 8. Относительная ошибка прогноза коэффициента пористости по амплитуде СЭЭ1 на двух коллекциях образцов

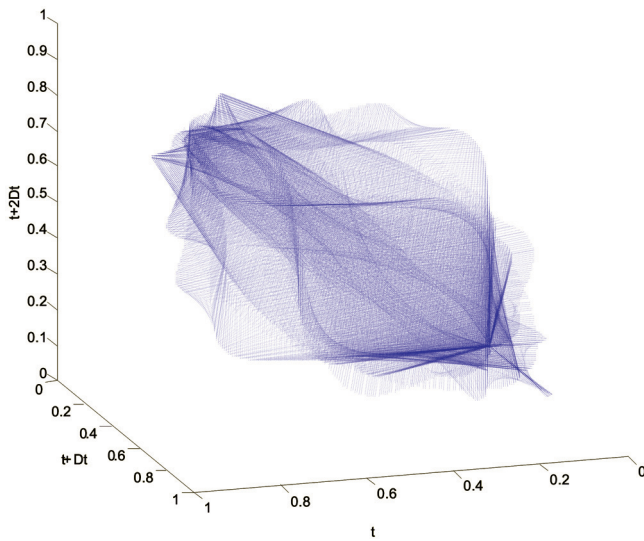


Рис. 9. Аттрактор, характеризующий связи между различными параметрами в процессе изменения удельного сопротивления под влиянием упругого воздействия (в условных нормированных координатах)

фектов, во флюидонасыщенных средах показывают их тесную связь с петрофизическими параметрами. Об этом же говорят многочисленные эксперименты.

Прежде всего рассмотрим связь этих параметров с амплитудой СЭЭ1. Упомянутый выше подход, связанный с аппроксимацией кривых изменения сопротивления функциями Миттаг-Лефлера, позволяет унифицировать все измерения и тем самым более объективно подходить к установлению корреляционных связей амплитуды СЭЭ1 и петрофизических параметров.

После изучения результатов физического моделирования СЭЭ1 и петрофизических параметров образцов было установлено, что в качестве базовой зависимости можно взять соотношение, типичное для связи параметров во фрактальных средах (линейная зависимость в билигарифмическом масштабе), аналогичное формуле Арчи:

$$A_{\text{СЭЭ}} \sim M\varphi^\alpha, \quad (2)$$

где  $A_{\text{СЭЭ}}$  – амплитуда СЭЭ1,  $M$  – коэффициент,  $\varphi$  – петрофизический параметр,  $\alpha$  – показатель степени, характеризующий структуру среды.

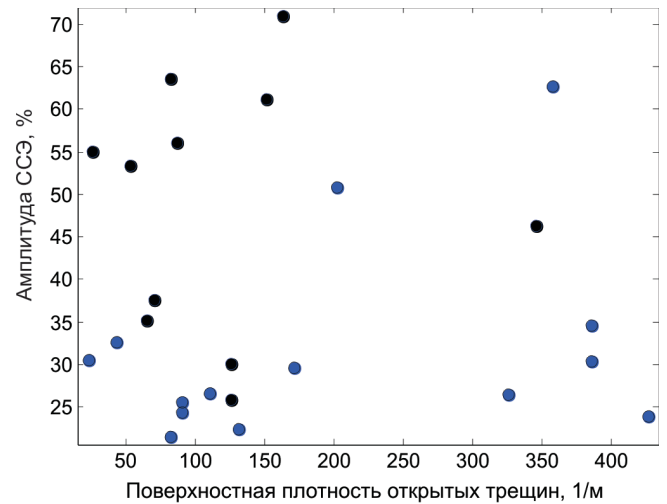


Рис. 10. Зависимость между поверхностной плотностью открытых трещин и амплитудой СЭЭ на группе образцов карбонатных пород

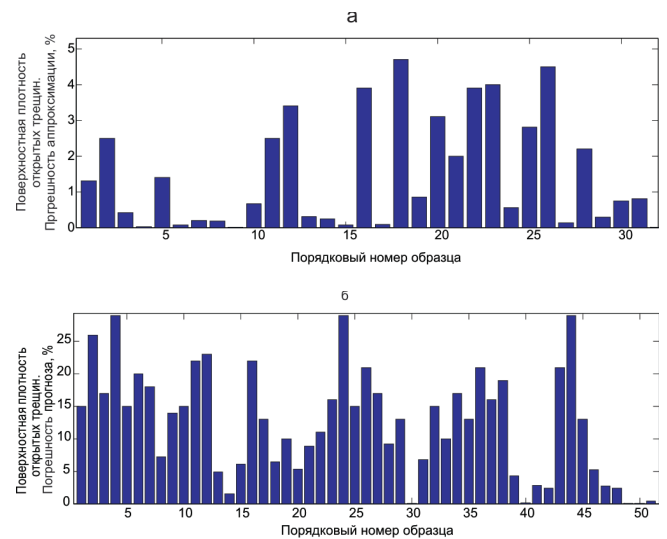


Рис. 11. Погрешность аппроксимации связи кривой спада сопротивления и поверхностной плотности открытых трещин на базовой коллекции (а) и погрешность прогноза значений поверхностной плотности открытых трещи по полученной зависимости на другой коллекции образцов (б)

Конкретные величины  $M$  и  $\alpha$  могут зависеть от частоты акустического поля и литологии образцов. Для примера рассмотрим связь амплитуды СЭЭ1, измеренной на частоте 65 кГц, с электрическими и акустическими свойствами карбонатных пород.

В частности соотношение типа (2), связывающее параметр пористости  $P_n$  (относительного сопротивления) и амплитуды СЭЭ1, имеет вид:

$$A_{\text{СЭЭ}} = 0,3548P_n^{-0,8758}, \quad (r = 0,81),$$

где  $r$  – коэффициент корреляции.

Связь между СЭЭ1 и интервальным временем пробега упругих волн  $\Delta T$  определяется соотношением

$$A_{\text{СЭЭ}} = 7,1 \cdot 10^{20} \Delta T^{-8,0786}, \quad (r = 0,81).$$

На рис. 7 показаны кривые, аппроксимирующие связь амплитуды СЭЭ1 с коэффициентом



пористости и интервальным временем пробега упругих волн. Обрабатываемые петрофизические данные были собраны в виде четырех коллекций образцов. Соотношение типа (2) было получено на основе данных первой коллекции. Как видно из рис. 7, данные остальных коллекций удовлетворительно укладываются в ту же зависимость. Это показывает возможность прогнозирования петрофизических параметров по результатам измерения СЭЭ1. Но использование только амплитуды СЭЭ1 даже на модельных примерах может приводить к достаточно большим погрешностям, что видно на рис. 8.

Улучшить ситуацию можно за счет использования полных кривых изменения сопротивления. В этом случае связи между параметрами характеризуются аттрактором, моделирующим поведение динамической системы, которая определяет процесс изменения сопротивления в результате упругого воздействия. Представление о поведении такого аттрактора дает рис. 9. Подробнее схема использования такого подхода рассмотрена в работе [11]. Используя этот подход можно прогнозировать, например, трещиноватость, точнее, в данном случае – поверхностную плотность открытых трещин, измеряемую на образцах. Как видно из рис. 10, этот параметр практически не коррелирует с амплитудой СЭЭ1.

Но по полным кривым изменения сопротивления можно получить удовлетворительную аппроксимацию и прогнозные оценки. Соответствующие результаты для частоты 65 кГц представлены на рис. 11.

Все показанные результаты получены для измерений с частотой 65 кГц, обладающих максимальной амплитудой СЭЭ1. Тем не менее аналогичные результаты могут быть получены при измерениях на других частотах. На рис. 12 видно, что кривые для трех различных частот достаточно близки.

На рис. 13 показано относительное отличие в прогнозе пористости по кривым изменения сопротивления на частотах 50 и 200 кГц по сравнению с прогнозом на частоте 65 кГц. Как видно, эти отличия лежат в пределах 20–25 %.

В заключение отметим еще один аспект возможного применения сейсмoeлектрического эффекта. На рис. 14 показаны результаты измерения амплитуды СЭЭ1 на трех группах образцов, различающихся по литологии. Первая группа представлена песчаниками, вторая и третья группы – карбонатами (образцы известняков и доломитов). Карбонаты ввиду сложного строения их пустотного пространства подразделяются две группы. Вторая группа образцов соответствует породам трещинно-каверно-порового типа с преобладанием каверно-порового типа, третья – породам с порово-трещинным типом пустотного пространства (преобладает трещинный тип).

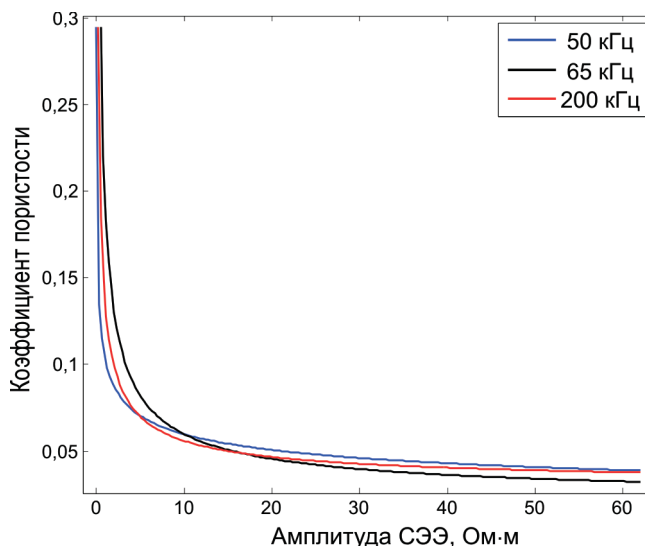


Рис. 12. Кривые связи между СЭЭ1 и коэффициентом пористости, полученные для разных частот акустического поля

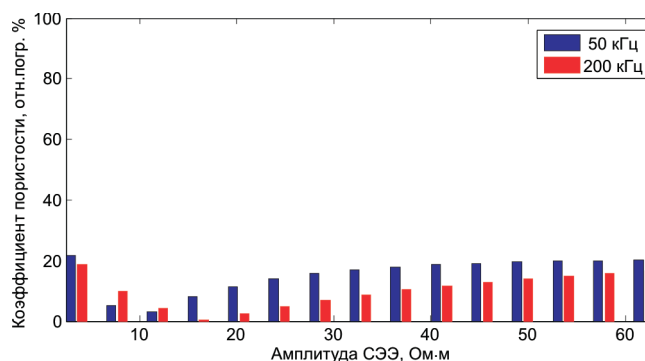


Рис. 13. Относительная ошибка прогноза коэффициента пористости по амплитуде СЭЭ1 на частотах 50 и 200 кГц по сравнению с прогнозом на частоте 65 кГц

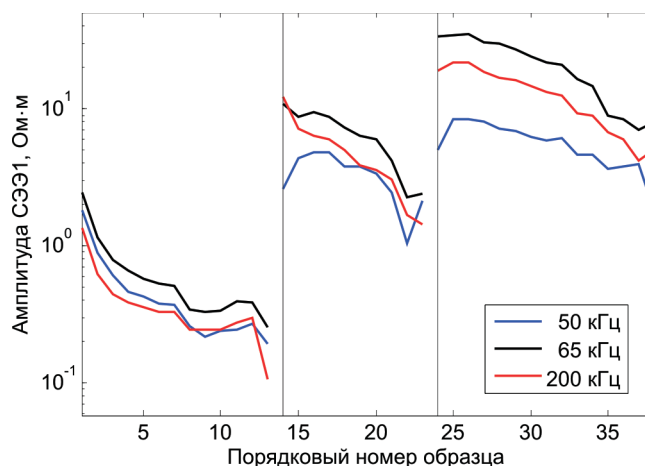


Рис. 14. Результаты измерения амплитуды СЭЭ1 на трех группах образцов, различающихся по литологии (группы отделены друг от друга вертикальными линиями)

В каждой группе образцы упорядочены по возрастанию пористости. Можно отметить, что группы достаточно четко подразделяются по амплитудному диапазону СЭЭ1. Например, для измерений на частоте акустического поля 65 кГц для первой группы СЭЭ1 лежит в диапазоне 0,25–2,44 Ом·м,



для второй – 2,27–10,8 Ом·м, для третьей – 7,53–50,7 Ом·м.

Аналогичный результат имеет место и для других частот. Это создает предпосылки использования СЭЭ1 для оценки литологических характеристик среды.

### Выводы

По результатам физического моделирования сейсмoeлектрического эффекта отмечено явление параметрического резонанса, обуславливающее неадекватную реакцию среды на упругое воздействие. Существование такого резонанса косвенно подтверждается известными теоретическими расчетами. Это позволяет объяснять нелинейные эффекты, наблюдаемые в экспериментах без использования предположений об энергетической неустойчивости среды.

На основе анализа петрофизических данных установлены зависимости между амплитудой СЭЭ1 и такими параметрами, как пористость, трещиноватость и интервальные скорости пробега продольных и поперечных волн. Это дает возможность использовать амплитуду СЭЭ1 как один из прогнозных параметров при изучении коллекторских свойств среды.

Показано, что точность прогноза фильтрационно-емкостных характеристик может быть увеличена при использовании полных кривых спада или релаксации сопротивления. Это позволяет применять при установлении латентных связей между параметрами СЭЭ1 и петрофизическими свойствами математический аппарат, используемый для описания поведения динамических систем.

Отмечена связь амплитуды СЭЭ1 с литологическими характеристиками горных пород.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Доровский, С. В.** О возможностях электроразведки при исследовании устойчивости водонефтяных слоистых систем [Текст] / С. В. Доровский, В. Н. Доровский, А. М. Блохин // Геология и геофизика. – 2006. – № 11. – С. 1185–1191.
2. **Дьяконов, Б. П.** Реакция трещиноватоблочных сред на сейсмоакустические воздействия и естественные колебания [Текст] / Б. П. Дьяконов, И. С. Файзуллин // Геофизика. – 2009. – № 3. – С. 5–11.
3. **Иванов, А. Г.** Эффект электризации пластов Земли при прохождении через нее упругих волн [Текст] / А. Г. Иванов // Докл. АН СССР. – 1939. – Т. 24, № 1. – С. 41–43.
4. **Имомназаров, Х. Х.** Численное моделирование некоторых задач теории фильтрации для пористых сред [Текст] / Х. Х. Имомназаров // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2001. – Т. 4, № 2. – С. 154–165.
5. **Майбук, З. Я.** Триггерный механизм нелинейных механоэлектрических преобразований

в орудненных разломах [Текст] / З. Я. Майбук // Физика Земли. – 2006. – № 10. – С. 51–64.

6. **Нахушев, А. М.** Дробное исчисление – математическая основа уравнения состояния фрактальных сред [Текст] / А. М. Нахушев, В. А. Нахушева // Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество: Тр. XVI Междунар. конф., Эльбрус-1. – Черноголовка: Изд-во Ин-та проблем химической физики РАН, 2001. – С. 120–122.

7. **Нигматуллин, Р. Р.** «Физика» дробного исчисления и ее реализация на фрактальных структурах [Текст] / Автореф. дис. ... д. ф.-м. н. [Текст] / Р. Р. Нигматуллин. – Казань: Изд-во ун-та, 1992. – 26 с.

8. **Об оценке** величины сейсмoeлектрического эффекта первого рода [Текст] / А. К. Манштейн, Г. В. Нестерова, В. В. Филатов, О. П. Саева // Технологии сейсморазведки. – 2013. – № 4. – С. 81–88.

9. **Саичев, А. И.** Асимптотические законы супердиффузии [Текст] / А. И. Саичев, С. Г. Уткин // Журнал технической физики. – 2003. – Т. 73, вып. 7. – С. 1–6.

10. **Светов, Б. С.** Основы геоэлектрики [Текст] / Б. С. Светов. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 656 с.

11. **Филатов, В. В.** Синергетические аспекты интерпретации геолого-геофизических данных [Текст] / В. В. Филатов, О. Ю. Светозерский. – М.: ГЕОКАРТ-ГЕОС, 2010. – 136 с.

12. **Френкель, Я. И.** К теории сейсмических и сейсмoeлектрических явлений во влажной почве [Текст] / Я. И. Френкель // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. – 1944. – Т. 8, № 4. – С. 133–150.

13. **Brace, W. F.** Electrical resistivity changes in saturated rock under stress [Text] / W. F. Brace, A. S. Orange // Science. – 1936. – Vol. 153. – P. 1525.

14. **Dorovsky, V.** A hydrodynamic model of water-oil layered systems containing gas [Text] / V. Dorovsky, S. A. Dorovsky // Mathematical and Computer Modelling. – 2002. – Vol. 35. – P. 751–757.

15. **Dorovsky, V.** A mathematical model for the movement of a conducting liquid through a conducting porous medium [Text] / V. Dorovsky, Kh. Imomnazarov // Mathematical and Computer Modelling. – 1994. – Vol. 20. – P. 91–97.

16. **Gorenflo, R.** Computation of the Mittag-Leffler function and its derivatives [Text] / R. Gorenflo, J. Loutchko, Yu. Luchko // Fract. Calc. Appl. Anal. – 2002. – Vol. 5. – P. 491–518.

17. **Kamenetsky, F. M.** Transient geo-electromagnetics [Text] / F. M. Kamenetsky, E. H. Stettler, G. M. Trigubovich // Ludwig-Maximilian-University of Munich. Dept. of the Earth and Environmental Sciences. Section Geophysics. – Munich, 2010. – 296 p.

18. **Novikov, V. V.** Temporal fractal model for the anomalous dielectric relaxation of inhomogeneous media with chaotic structure [Text] / V. V. Novikov, V. P. Privalko // Phys. Rev. E. – 2001. – Vol. 64. – P. 315041–315041.





19. **Pride, S. R.** Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media [Text] // *Phys. Rev.* – 1994. – B. 50, N 21. – P. 15678–15696. Vol. 92, pp. 3278–3290.

20. **Podlubny, I.** Mittag-Leffler function [Electronic resource] / I. Podlubny // Matlab-Code that calculates the Mittag-Leffler function with desired accuracy. Matlab File Exchange: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange>, 2006

21. **Shlesinger, M. F.** Strange Kinetics [Text] / M. F. Shlesinger, G. M. Zaslavsky, J. Klafter // *Nature*. – 1993. – Vol. 363. – P. 31–37.

22. **Williams, G.** Non-symmetrical dielectric relaxation behaviour arising from a simple empirical decay function [Text] / G. Williams, D. C. Watts // *Trans. Faraday Soc.* – 1970. – Vol. 66, N 1. – P. 80–85.

## REFERENCES

1. Dorovskiy S. V., Dorovskiy V. N., Blokhin A. M. The potential of electrical prospecting in studying the stability of oil-water layered systems. *Russian Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no. 11, pp. 1165–1173.

2. Dyakonov B. P., Fayzullin I. S. [Response of jointed-block media to seismic-acoustic influences and natural fluctuations]. *Geofizika – Geophysics*, 2009, no. 3, pp. 5–11. (In Russ.).

3. Ivanov A. G. [Effect of the Earth's layers electrization when elastic waves pass through it]. *Dokl. AS SSSR [AS SSSR Reports]*. 1939, vol. 24, no. 1, pp. 41–43. (In Russ.).

4. Imomnazarov Kh. Kh. [Numerical modeling of some problems of the filtration theory for porous media]. *Sib. zhurn. industr. Matem. – Siberian journal of industrial mathematics*, 2001, vol. 4, no. 2, pp. 154–165. (In Russ.).

5. Maybuk Z. Ya. [The trigger mechanism of non-linear dynamoelectric transformations in mineralized faults]. *Fizika Zemli – Earth's physics*, 2006, no. 10, pp. 51–64. (In Russ.).

6. Nakhushev A. M., Nakhusheva V. A. [Fractional calculation is a mathematical basis for the equation of fractal medium conditions]. *Trudy XVI Mezhdunarodnoy konferentsii "Vozdeystvie intensivnykh potokov energii na veshchestvo", Elbrus, 2001* [Proc. International Conference "Influence of high energy flows on substance", Elbrus, 2001]. Chernogolovka, Institut problem khimicheskoy fiziki RAN Publ., 2001, pp. 120–122. (In Russ.).

7. Nigmatullin R. R. «Fizika» drobnogo ischisleniya i ee realizatsiya na fraktal'nykh strukturakh. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk ["Physics" of fractional calculation and its realization on fractal structures. Doct. diss.]. Kazan, Kazan State University, 1992, 231 p. (In Russ.).

8. Manshteyn A. K., Nesterova G. V., Filatov V. V., Saeva O. P. [On the estimation of the first-order seismic-electric effect]. *Tekhnologii seysmoraz-*

*vedki – Seismic exploration technologies*, 2013, no. 4, pp. 81–88. (In Russ.).

9. Saichev A. I., Utkin S. G. [Asymptotic laws of superdiffusion]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Applied physics journal*, 2003, vol. 73, no. 7, pp. 1–6. (In Russ.).

10. Svetov B. S. *Osnovy geoelektriki* [Goelectrics bases]. Moscow, LKI Publ., 2008, 656 p. (In Russ.).

11. Filatov V. V., Svetozerskiy O. Yu. *Sinergeticheskie aspekty interpretatsii geologo-geofizicheskikh dannyykh* [Synergetic aspects of geological-geophysical data interpretation]. Moscow, GEOKART-GEOS Publ., 2010, 136 p. (In Russ.).

12. Frenkel' Ya. I. [On theory of seismic and seismic-electric phenomena in wet soil]. *Izv. AN SSSR. Ser. geogr. i geofiz. – A Journal of Academy of Sciences of USSR*, 1944, vol. 8, no. 4, pp. 133–150. (In Russ.).

13. Brace W. F. Electrical resistivity changes in saturated rock under stress. *Science*, 1936, vol. 153, p. 1525.

14. Dorovsky V. A., Dorovsky S. A. A hydrodynamic model of water-oil layered systems containing gas. *Mathematical and Computer Modelling*, 2002, vol. 35, pp. 751–757.

15. Dorovsky V., Imomnazarov Kh. A mathematical model for the movement of a conducting liquid through a conducting porous medium. *Mathematical and Computer Modelling*, 1994, vol. 20, pp. 91–97.

16. Gorenflo R., Loutchko R., Luchko Yu. Computation of the Mittag-Leffler function and its derivatives. *Fract. Calc. Appl. Anal.*, 2002, vol. 5, pp. 491–518.

17. Kamenetsky F. M., Stettler E. H., Trigubovich G. M. Transient geo-electromagnetics. Munich, Ludwig-Maximilian-University of Munich, Dept. of the Earth and Environmental Sciences, Section Geophysics Publ., 2010. 296 p.

18. Novikov V. V., Privalko V. P. Temporal fractal model for the anomalous dielectric relaxation of inhomogeneous media with chaotic structure. *Phys. Rev. E.*, 2001, vol. 64, pp. 315041–3150411.

19. Pride S. R. Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media. *Phys. Rev.*, 1994, B 50, no. 21, pp. 15678–15696, vol. 92, pp. 3278–3290.

20. Podlubny I. Matlab-Code that calculates the Mittag-Leffler function with desired accuracy. Available at Matlab File Exchange: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange>, 2006.

21. Shlesinger M. F., Zaslavsky G. M., Klafter J. Strange Kinetics. *Nature*, 1993, vol. 363, pp. 31–37.

22. Williams G., Watts D. C. *Non-symmetrical dielectric relaxation behaviour arising from a simple empirical decay function*. *Trans. Faraday Soc.*, 1970, vol. 66, no. 1, pp. 80–85.

© B. B. Филатов, В. Н. Савинов, О. Ю. Светозерский, 2015

