

# НЕЛИНЕЙНЫЕ МЕХАНОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

П.А. Казначеев<sup>1</sup>, А.Н. Камшилин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия, e-mail: p\_a\_k@mail.ru

**Аннотация:** Механоэлектромагнитные преобразования в горных породах происходят при разной степени насыщенности среды механической энергией. При применении теории Онзагера для объяснения сейсмoeлектрических эффектов обычно пренебрегается влиянием градиентов температуры, концентрации растворенных веществ и обратным влиянием вторичного электрического поля на упругое. Последнее может приводить к видимому нарушению линейных законов, связывающих электрические (закон Ома) и упругие (закон Гука) величины. Наличие неоднородностей на всех масштабах рассмотрения среды, согласно концепции академика М.А. Садовского, приводит к возможности существования в ней «быстрых» вторичных электромагнитных волн. При наличии пор малых размеров, сопоставимых с толщиной диффузной части двойного электрического слоя, возможно возникновение нормальной к его поверхности составляющей электрического поля. Для объяснения комбинационных гармоник и параметрического резонанса как нелинейных явлений рассмотрена модель частично заполненной флюидом поры. В таком случае возможна модуляция упругим воздействием электрических параметров. Определены условия экспериментального наблюдения связанной с этим нелинейности. Сформулированы три критерия нелинейности с точки зрения экспериментально определяемых параметров: «амплитудная» нелинейность, «аддитивная» нелинейность и «нарушение» закона Ома. Определены управляющие параметры, типы возбуждающих сигналов и соответствующие проявления нелинейностей.

**Ключевые слова:** горные породы, механоэлектрические преобразования, сейсмoeлектрический эффект, электромагнитные явления в материальных средах, пористая среда, нелинейность.

**Благодарность:** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00698 (поиск возможных источников нелинейности и определение способов ее исследования, частично — обзор литературы, постановка задачи и обоснование подхода) и в рамках гос. задания ИФЗ РАН по теме № 0144-2014-0096.

**Для цитирования:** Казначеев П. А., Камшилин А. Н. Нелинейные механоэлектрические преобразования в пористых средах: теоретические предпосылки // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 7. — С. 83–103. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-83-103.

## Nonlinear mechanoelectrical transformations in porous media: theoretical background

P.A. Kaznacheev<sup>1</sup>, A.N. Kamshilin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> United Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia, e-mail: p\_a\_k@mail.ru

---

**Abstract:** Mechanoelectrical transformations take place in rocks at different scale of saturation with mechanical energy. Nonlinearity of such transformations at high energy saturation (failure) is a subject of extensive investigation. At low energy saturation (elastic waves), these transformations reduce to linear seismoelectrical phenomena in porous media saturated with fluids. However, features of real geophysical environment and the experimental data are reflective of potential nonlinearity. Application of the Onsager theory to explanation of seismoelectrical phenomena usually neglects influences exerted by temperature gradients, concentration of dissolved substances and inverse effect of secondary electric field on elastic field. The latter can bring apparent violation of linear laws connecting electric (Ohm's law) and elastic (Hooke's law) values. Presence of discontinuities at all scales in a medium means, according to Academician Sadovsky, existence of fast secondary electromagnetic waves. Furthermore, in case that small size pores comparable with the thickness of diffusion part of double electric layer exist, it is possible that the electric field component appear along the normal to its surface. The combination harmonics and parametric resonance as nonlinear phenomena are explain using a model of a pore partly filled with fluid. In this case, it is possible to modulate electric parameters by elastic disturbance. Conditions of observation of the related nonlinearity are determined. Three criteria of nonlinearity are formulated in terms of experimentally found parameters: amplitude nonlinearity, additive nonlinearity and Ohm's law violation. The governing parameters, types of generating signals and respective nonlinearity events are defined.

**Key words:** rocks, mechanoelectrical transformations, seismoelectrical effect, electromagnetic events in material media, porous medium nonlinearity.

**Acknowledgements:** This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Project No. 18-35-00698, and by the state assignment of Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, theme No. 0144-2014-0096.

**For citation:** Kaznacheev P. A., Kamshilin A. N. Nonlinear mechanoelectrical transformations in porous media: theoretical background. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(7):83-103. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-83-103.

---

## Введение

Преобразование энергии различных геофизических полей в настоящее время вызывает большой интерес у исследователей. С точки зрения возможности получения новых фундаментальных знаний о процессах, происходящих в геосферах, интерес мотивирован тем, что в геофизической среде, в силу ее значительной энергонасыщенности и диссипативности, такие преобразования происходят непрерывно. Наглядным примером может служить диссипация энергии сейсмического события через механические, упругие, тепловые поля и физико-химические преобразования.

Практический интерес связан с возможностью разработки новых методов изучения глубинных процессов, поисков и разведки полезных ископаемых, контроля среды.

Сейсмическое и электрическое поля — одни из самых изученных типов физических полей, которые существуют в геофизической среде, широко используются на практике (в разведке) и которые можно эффективно создавать и измерять. Поэтому изучение их взаимных преобразований перспективно как с теоретической, так и с практической точки зрения. С момента открытия в первой половине XX века факта влияния упругих волн в осадочных породах на их электрические параметры [1, 2], сейсмoeлектрические эффекты 1-го и 2-го рода продолжают исследоваться как с теоретической, так и с экспериментальной точки зрения ([3–6] и др.). Сейсмoeлектрический эффект 1-го рода заключается в изменении электропроводности пород при воздействии упругих волн. Сейсмoeлектрический эффект 2-го рода заключается в возбуж-

дении вторичного электрического поля при прохождении упругой волны в среде. Обычно сейсмoeлектрические эффекты связывают с электрокинетическими процессами в пористой флюидонасыщенной среде, на границе минерального скелета которой и флюида может существовать двойной электрический слой. Электрокинетические процессы, в свою очередь, полагаются обусловленными упругими волнами, распространяющимися в пористой флюидонасыщенной среде и описываемыми теорией Био [7, 8]. Явления такого рода могут возникать в горных породах при относительно низкочастотном сейсмическом воздействии (до первых единиц мегагерц).

В более широком смысле к сейсмoeлектрическим [6] (сейсмoeлектромагнитным [9]) и механoeлектрическим [10] (механoeлектромагнитным [11]) явлениям относят также проявление пьезoeлектрического эффекта в горных породах (возникающее как при переменном, так и при постоянном воздействии механических напряжений, см., напр., [12]), генерацию электромагнитного излучения при разрушении и перестройке кристаллической структуры зерен минералов горных пород, а также трещинообразовании (частоты вторичного электромагнитного поля от первых десятков кГц и выше). Последнее применительно к изучению и контролю геофизической среды теоретически рассмотрено в [13], с точки зрения полевых исследований — например, в [14], и с точки зрения аппаратных разработок — например, в [15]. Изучение природных явлений, связанных с упругими волнами и изменением механических напряжений (например, при сейсмических событиях), также говорит о сопутствующей генерации вторичных электрических сигналов [9]. В продолжение работ упомянутых авторов на основе электрокинетической теории удалось объяснить не только некото-

рые аномальные электромагнитные сигналы, сопровождающие землетрясения [16], но и предложить способы контроля напряженно-деформированного состояния среды [17]. Отметим, что именно интерес к электромагнитным явлениям, связанным с землетрясениями, а также с процессами в очаговых и разломных зонах [9, 18] послужил новым стимулом к дальнейшему развитию теории сейсмoeлектрических эффектов [4, 5].

Наиболее общим понятием, на наш взгляд, является понятие «механoeлектромагнитных явлений». Если исследователь обоснованно ограничивается параметрами только одного из вторичных полей — электрического или магнитного, то можно говорить о механoeлектрических и механомагнитных явлениях. Далее будем использовать эти термины в указанном смысле.

Процессы разрушения горных пород протекают при высокой энергонасыщенности среды, связанной с критическим напряженно-деформированным состоянием. Наблюдаемые при этом механoeлектромагнитные явления однозначно характеризуются нелинейностью, связанной с нелинейностью самого процесса разрушения [11]. Также, малый масштаб разрушений (развитие микротрещин) приводит к генерации высокочастотного электромагнитного сигнала (электромагнитное излучение, ЭМИ). Нелинейность механoeлектромагнитных явлений при разрушении в настоящее время активно изучается. Она не связана непосредственно с классическим пониманием электрокинетических процессов в пористых средах.

Электрокинетические процессы, а также, частично, пьезoeлектрические процессы в нормальных условиях могут происходить при малой энергонасыщенности среды, в отсутствие критического напряженно-деформированного состояния. Нелинейность механoeлектромаг-

Таблица 1

**Типизация механоэлектромагнитных явлений в горных породах**  
*Typification mechanoelectrical phenomena in rocks*

Тип эффекта	Состояние среды	Высокая энерго-насыщенность (разрушение породы)	Средняя энерго-насыщенность (стабильное НДС)	Низкая энерго-насыщенность (упругие волны)
Изменение электромагнитных свойств	механоэлектромагнитные преобразования [13] сейсмоэлектромагнитные явления [9]		электрический и магнитный эффекты памяти [21, 22]	сейсмоэлектрический эффект 1-го рода [1]
Возбуждение электрического или магнитного полей			пьезоэлектрический эффект [23]	сейсмоэлектрический эффект 2-го рода [2]
Возбуждение электромагнитного поля в широком диапазоне частот (ЭМИ)			электро-магнитный эмиссионный эффект памяти [24]	механоэлектрические явления [10]

нитных явлений при этом не является очевидной в силу использования для их описания линейных моделей. Поэтому целесообразно выделить две группы процессов по условиям проявления механоэлектромагнитных явлений и, соответственно, по возможному источнику их нелинейного характера — при больших и малых механических воздействиях. Нелинейность механоэлектромагнитных явлений при малых механических воздействиях и электрокинетических процессах остается пока слабо изученной. Поэтому задача ее исследования является актуальной.

Отдельно отметим, что возможны ситуации, когда масштаб проявления нелинейности при разрушении мал и сопоставим с размером характерных структурных элементов породы. В этом случае нелинейность может рассматриваться как часть нелинейной модели эффективной пористой среды. Примером такой ситуации может быть термическое разрушение горных пород, описываемой нелинейной задачей термоупругости [19], когда разрушение происходит в масштабах зерен и контактов зерен [20].

Исходя из условий напряженно-деформированного состояния (степени «насыщенности» горной породы механической энергией), а также выделяя конкретные типы вторичного изменения электромаг-

нитных параметров, можно произвести типизацию механоэлектромагнитных явлений (табл. 1).

Настоящая работа посвящена анализу возможной нелинейности механоэлектрических преобразований в пористых средах разной степени флюидонасыщения, которые охватывают сейсмоэлектрический эффект 2-го рода и, частично, сейсмоэлектрический эффект 1-го рода с механоэлектрическими явлениями, как они понимаются в [10].

**Нелинейность механоэлектрических преобразований: предпосылки**

Открытие сейсмоэлектрических эффектов 1-го и 2-го рода потребовало разработки теоретических моделей воздействия упругих волн на электрические параметры многофазной среды [3]. Оценка величины сейсмоэлектрического эффекта 1-го рода проводилась, например, в [25]. Для эффекта 2-го рода на основе уравнений Био [7, 8] и Прайда [5] в [26] были получены решения для разных моделей геофизической среды. Было выделено два типа вторичных электрических полей — «вмороженное» и «быстрое». Первое распространяется вместе с продольной упругой волной с той же скоростью и отлично от нуля только там, где упругое поле существует. Электромагнитные

волны, связанные с «быстрым» полем, обусловлены поперечной составляющей упругого поля и распространяются много быстрее упругой волны, но существуют только в неоднородных средах. Там же [26] дан пример приложения теории к модели двухслойной среды, в которой возникает сейсмoeлектрический эффект. В [26] используется линейная модель взаимосвязи упругого поля, электрического поля и управляющих параметров и определены условия ее применимости. В качестве практического примера рассмотрено применение модели для сейсмoeлектрического каротажа скважин с индукционным приемом вторичного электромагнитного поля (частоты — десятки килогерц). Практический интерес к изучению этих явлений подтверждается и другими работами, направленными на разработку методов разведки на их основе (например, [27—29]).

Очень подробно теория сейсмoeлектрических явлений и возможное практическое применение рассмотрено в [30]. Приведенная там полная система уравнений механоэлектромагнитных явлений описывает сейсмoeлектрический эффект 1-го рода и обратный ему эффект, сейсмoeлектрический эффект 2-го рода и обратный ему электромеханический (или электросейсмический по [31]) эффект, а также процессы при совместном механическом и электромагнитном воздействии. Уравнения явно линеаризуются по возмущающим полям, что обосновывается малыми амплитудами возмущений. Там же рассмотрены некоторые зависимости результирующих параметров механоэлектромагнитных преобразований от возбуждающих (частота, амплитуда) и внешних (постоянное внешнее электрическое поле, температура, сжимающие напряжения, концентрация раствора) управляющих параметров, а также свойств породы (пористость, проницаемость, размеры пор).

Экспериментальные полевые исследования сейсмoeлектрического эффекта были направлены на выявление вторичного электрического поля при мощном виброакустическом воздействии, изучению отклика различных пород, совершенствованию методики изучения эффекта, оценки флюидонасыщенности порового пространства горных пород (например, [32, 33] и др.). Лабораторные исследования шли по пути изучения частотных и временных параметров откликов образцов различных пород в разных условиях, например, разной влагонасыщенности: [34, 35, 4, 36—38] и др.

Особенно интересны исследования механоэлектрических преобразований с отслеживанием резонансных явлений [37]. Такой подход позволяет достичь большой чувствительности к изменениям параметров преобразования, связанных, например, с воздействием внешнего постоянного электрического поля [39], изменением концентрации и распределения флюидов [40]. Подход с исследованием резонансных явлений открывает еще одну возможность выделения механоэлектрического преобразования на фоне помеховых влияний — исследование комбинационных гармоник и параметрического резонанса [41, 42]. При этом частоты возникающего сигнала могут отличаться как от частоты основного (несущего) воздействия, так и от частоты раскачивающего (модулирующего) воздействия (см., например, [43]). В свою очередь эти воздействия могут быть обусловлены физическими полями разной природы.

Свидетельства о наблюдении комбинационных гармоник и параметрического резонанса — прямое указание на возможную нелинейность механоэлектрических преобразований в пористых средах. Комбинационные гармоники и параметрический резонанс не только предполагают отсутствие аддитивности

двух вторичных электрических полей, возбуждаемых на двух разных частотах, но и требуют наличия физического механизма передачи энергии иной природы, не связанного напрямую с электрокинетическими процессами. Примером (аналогом) подобной ситуации может служить хорошо известное рассеяние Манделштама-Бриллюэна, где нелинейность рассеяния света (расщепление частот) обусловлена наличием упругих волн, связанных с тепловыми флуктуациями частиц среды.

Еще одним прямым указанием на нелинейность механоэлектрического преобразования являются опыты с воздействием малого количества флюида на вторичное электрическое поле [44]. В работе показано, что при увлажнении сухого образца горной породы малым количеством керосина наблюдается нелинейное изменение электрического отклика, проявляющееся в появлении дополнительных гармоник и многократном изменении величины основной гармоники. Авторы предполагают, что локальное добавление флюида создало неоднородность в виде зоны повышенного флюидонасыщения.

Сейсмоэлектрический эффект вводится фактически только для микронеоднородных сред — сред, обладающих пористостью. Развитие концепции микронеоднородных сред во второй половине XX века привело к возможности работы с реальными геофизическими средами, обладающими микроструктурой (трещиноватостью, пористостью, слоистостью, зернистостью, неоднородностью распределения структурных элементов по размерам в микромасштабах и др.). Особенно это было важно для развития сейсморазведки, поскольку позволило перейти от упругих параметров идеальных сред к понятию эффективных упругих параметров реальных сред — горных пород, обладающих микроструктурой [45].

При традиционном описании сейсмоэлектрического эффекта 2-го рода возникновение «быстрых» электромагнитных волн может происходить только при наличии неоднородностей. Обычно предполагается, что размер таких неоднородностей должен быть существенно больше длины возбуждающей упругой волны, а микроструктуру породы формируют неоднородности с размерами, существенно меньшими длины волны.

С другой стороны, широко признанная концепция академика М.А. Садовского о блочно-иерархическом самоподобном строении геофизической среды [46] предполагает принципиальное наличие неоднородностей разного масштаба, включая и сопоставимые с длиной волны возбуждающего упругого поля. Такими неоднородностями могут быть не только макронеоднородности, но и относительно крупные микронеоднородности горных пород (т.е. «мезонеоднородности» — например, крупные зерна или микротрещины, их скопления, кластеры или системы, зоны повышенной концентрации растворенных во флюиде веществ и др.), которые тоже обладают блочным принципом формирования [47]. Если размер этих неоднородностей сопоставим с длиной волны, но меньше характерного размера исследуемого объема среды и кривизны фронта возбуждающей упругой волны, то сейсмоэлектрическое преобразование может проявляться специфическим образом. А именно, в макроскопическом масштабе генерация множества электромагнитных волн на «мезонеоднородностях» может выглядеть как возбуждение вторичной электромагнитной волны на волновом фронте исходной упругой волны.

В любом случае при анализе сейсмоэлектрических явлений представление реальной горной породы и геологической среды однородной двухфазной системой матрица-флюид является только первым

приближением. Границы применимости указанного приближения напрямую определяются ее линейностью. Поэтому задача определения нелинейности механоэлектрических преобразований напрямую связана с определением границ применимости указанной модели. Для своего решения эта задача требует как экспериментальных исследований, так и анализа теоретических предпосылок. Последнему посвящена настоящая работа.

### Поиск возможных источников нелинейности

Рассмотреть все возможные источники нелинейности механоэлектрических преобразований невозможно, поскольку существуют разные механизмы возбуждения электромагнитного поля при механическом воздействии на пористую среду, не только электрокинетического происхождения. Поэтому целесообразно ограничиться наиболее общепринятой моделью, и рассмотреть возможные источники нелинейности как внутри модели, так и вне ее, среди общих факторов, характеризующих горные породы как пористую среду.

Основной для описания механоэлектрических преобразований в пористых средах в низкочастотной области является модель сейсмоэлектрического эффекта 2-го рода. Она предполагает, что основной механизм возбуждения электромагнитного поля упругим связан с электрокинетическими процессами и двойным электрическим слоем в системе матрица (каркас) горной породы — жидкий флюид в поровом пространстве. Задача разбивается на несколько составляющих — распространение упругой волны в пористой флюидонасыщенной среде, определение градиента давления, возбуждение электромагнитного поля и нахождение его распределения [6]. Возбуждение электромагнитного поля описывается феноменологическим подходом —

для нахождения полного тока в среде используется теория Онзагера в линеаризованном виде. Рассмотрим этот подход подробнее.

Для потока зарядов в пористой среде для изотермического случая соотношение Онзагера может быть записано в виде [6]:

$$j^z = L_{11} \cdot \nabla \varphi + L_{12} \cdot \nabla p + L_{13} \cdot \nabla C, \quad (1)$$

где  $j^z$  — полная плотность электрического тока;  $\nabla \varphi$  — градиент электрического потенциала (напряженность электрического поля);  $\nabla p$  — градиент порового давления (давления жидкой фазы — флюида);  $\nabla C$  — градиент концентрации растворенных в жидкой фазе веществ;  $L_{11}$ ,  $L_{12}$ ,  $L_{13}$  — коэффициенты Онзагера, связывающие указанные величины.

Для нахождения упрощенного решения в явном виде принимается два допущения, справедливые для некоторых случаев реальной среды:

- Изотермический случай, когда пренебрегают тепловыми процессами и принимают градиент температуры равным нулю

$$\nabla T = 0. \quad (2)$$

- Однородность концентрации растворенных веществ в насыщающем флюиде, т.е. равенство нулю градиента концентрации:

$$\nabla C = 0. \quad (3)$$

Очевидно, что невыполнение условий (2)—(3) усложняет связь (1) между параметрами в модели сейсмоэлектрического преобразования. Учитывая также, что механическое воздействие будет влиять на эволюцию неоднородной концентрации (перемешивание зон разной концентрации) и приводит к тепловым флуктуациям (разная диссипация), нелинейность связи между  $j$  и  $\nabla p$  может приводить у нелинейности механоэлектрического преобразования в целом.

В [26] записана полная система уравнений для возбуждения электромагнитного поля в частотной области. Она опи-

рается на два базовых уравнения — закон непрерывности полного тока и закон для плотности потока флюида относительно твердого скелета породы (пористой среды), следующий из уравнений Био:

$$j^{\Sigma} = j + j^{\text{ex}}, \quad (4a)$$

$$w = i \cdot \omega \cdot \phi \cdot (u_s - u_f), \quad (4b)$$

где  $j^{\text{ex}}$  — плотность стороннего электрического тока, который порождается электрокинетическими процессами;  $w$  — поток движения насыщающего флюида относительно твердого скелета горной породы;  $\omega$  — круговая частота;  $\phi$  — пористость среды;  $u_s$  и  $u_f$  — смещения твердой и жидкой фаз среды. С учетом теории Био и Онзагера уравнения (4a)–(4b) в [26] записаны в виде симметричной системы уравнений:

$$j^{\Sigma} = \sigma(\omega) \cdot E + L(\omega) \cdot p_{\text{fs}}, \quad (5a)$$

$$w = L(\omega) \cdot E + k(\omega)/\eta \cdot p_{\text{fs}}, \quad (5b)$$

где  $p_{\text{fs}} = (-\nabla p + \omega^2 \cdot \rho_f \cdot u_s)$ , причем  $\rho_f$  — плотность жидкой фазы (флюида);  $\sigma(\omega)$  — электрическая проводимость в частотнозависимом виде;  $L(\omega)$  — электрокинетический коэффициент (зависит от пористости, дзета-потенциала жидкой фазы, толщины двойного электрического слоя, концентрации растворенных в жидкой фазе веществ, размера пор);  $k(\omega)$  — проницаемость пористой среды в частотнозависимом виде;  $\eta$  — вязкость жидкой фазы (флюида).

Поиск решения в [26] ведется в предположении о малости обратного воздействия электрического поля на механическое движение среды, т.е. первым слагаемым в (5b) пренебрегается и выполняется условие:

$$L(\omega) \cdot E \ll (k(\omega))/\eta \cdot p_{\text{fs}}. \quad (6)$$

Если этого не сделать, то попытка найти прямое решение задачи приводит к рекурсивной функции. Такие задачи получили название самосогласованных задач геофизики [48]. Приближенное решение их может быть найдено в рамках теории возмущений.

Общим следствием самосогласованных задач геофизики является нарушение законов, связывающих базовые параметры возбуждающего поля. Т.е. если, например, учитывать механоэлектрические преобразования в геофизической среде (и только их), то при возбуждении электрического поля нарушается закон Ома, а при возбуждении упругого поля — закон Гука. Разумеется, нарушение, например, закона Ома не связано с неверностью фундаментальных положений электродинамики. Оно связано с тем, что в пористой флюидонасыщенной среде возникает такое взаимное преобразование энергии электрического и упругого полей, которое приводит к нарушению линейной связи между измеряемыми параметрами электрического поля — напряженностью электрического поля  $E$  и плотностью тока  $j$ , которое выражается законом Ома для классической электродинамики:

$$j = \sigma \cdot E \quad (7)$$

Такое нарушение очевидно из прямого рассмотрения уравнений (5a)–(5b), если понимать следующее. Плотность полного тока  $j^{\Sigma}$  и плотность тока проводимости  $j$  можно различить, только отделив сторонний ток  $j^{\text{ex}}$ , что практически невозможно в указанной задаче (о попытке различить эти токи в макроскопическом масштабе будет сказано ниже). Но можно измерить напряженность поля по его действию на заряды, а плотность полного тока — по его магнитному действию, что вполне реализуемо для геофизической среды [49].

То же справедливо для случая, если возбуждается упругое поле — в геофизической среде в силу существования механоэлектрических преобразований будет нарушаться линейная связь между тензором напряжений  $s$  и тензором деформаций  $E$ , описываемая законом Гука:

$$s_{mn} = C_{mnkl} \cdot E_{kl}, \quad m, n, k, l = 1, 2, 3, \quad (8)$$

где  $C$  — тензор упругих параметров.



Для простого понимания можно представить, что в реальных условиях упругое воздействие на пористую среду возбуждает вторичное электрическое поле, которое, в свою очередь, приводит к появлению вторичного по отношению к нему упругого поля, и так далее. В таком представлении линейность механоэлектрических преобразований означает пренебрежение высшими порядками преобразования полей, и учитывается только преобразование возбуждающего упругого поля во вторичное электрическое. Поэтому невыполнение условия (6) является прямой предпосылкой нелинейности механоэлектрических преобразований. Количественная интерпретация условия (6) затруднена, но выше было сказано, что невыполнение (6) приводит к невыполнению (7) и (8), поэтому именно проверка выполнения закона Ома и закона Гука будет основным критерием нелинейности механоэлектрических преобразований.

Еще одним возможным источником нелинейности является упомянутая выше концепция академика М.А. Садовского о блочно-иерархическом строении реальной геофизической среды. В рамках традиционной модели сейсмoeлектрического эффекта это может приводить к двум следствиям. Во-первых, на микроуровне может не выполняться условие малости толщины диффузной части двойного электрического слоя по сравнению с размером пор. Тогда нельзя пренебречь нормальной к поверхности двойного электрического слоя составляющей скорости смещения жидкой фазы [26]. В связи с этим электрическое поле сможет возникать в геометрически однородных двухфазных структурах (плоских или цилиндрических порах). Экспериментальные данные петрофизических исследований (например, [50–52]) показывают существенный разброс размеров пор, от десятков нанометров ( $10^{-8}$  м) до долей миллиметров ( $10^{-3}$  м). Нижняя граница сопо-

ставима с оценкой толщины диффузной части двойного электрического слоя в  $10^{-8}$  м, приведенной, например, в [26].

Во-вторых, блочно-иерархическая модель среды предполагает наличие неоднородностей по упругим, электрическим, петрофизическим параметрам на всех масштабах рассмотрения среды. Важное следствие существования «быстрых» вторичных электрических волн, возникающих в неоднородных средах при сейсмoeлектрическом эффекте 2-го рода, автоматически распространяется на такую «эффективно неусредняемую» среду.

Последним из возможных источников нелинейности механоэлектрического преобразования, следующих из теории и представляющих существенный интерес в условиях исследования реальной среды, отметим одновременную анизотропию ее упругих, электромагнитных и петрофизических свойств. Теория сейсмoeлектрического эффекта 2-го рода для анизотропных сред разработана в своей базовой концепции (например, [30, 26]), но пока получено мало практических решений для частных задач. Возможно, что существенно усложняющаяся связь между параметрами упругого и электромагнитного полей приведет к существованию «быстрой» вторичной электромагнитной волны в анизотропной среде с малоконтрастными неоднородностями. Одна анизотропия по электромагнитным свойствам, когда вектор плотности стороннего тока  $j^{\text{ex}}$  будет несонаправлен вектору напряженности электрического поля  $E$ , приведет к сложному взаимодействию электромагнитных волн, порожденных поперечной и продольной упругой волной.

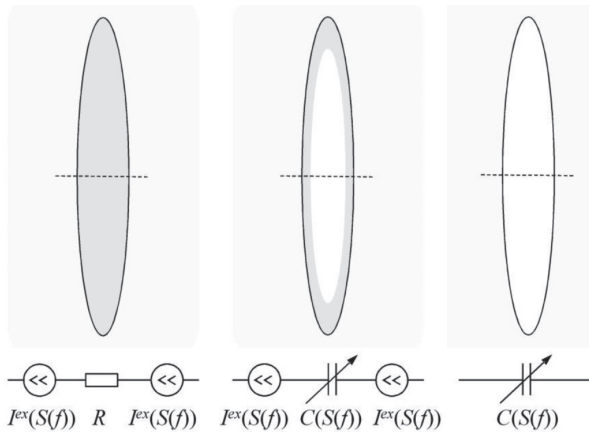
Кроме источников нелинейности механоэлектрических преобразований, следующих из теории сейсмoeлектрического эффекта, необходимо проанализировать экспериментальные данные, свидетельствующие о проявлении нелинейности.

Наибольший интерес представляют случаи явного нелинейного отклика среды. К таким случаям относится упомянутое выше возникновение комбинационных гармоник при механоэлектрических преобразованиях, наблюдавшееся в [41, 42]. Рассмотрим феноменологическую модель, способную, на наш взгляд, пояснить возможные причины возникновения комбинационных гармоник (рисунок).

На модели на рисунке показано три стадии флюидонасыщения эллипсоидной поры, находящейся в слабо электропроводящей (по сравнению с флюидом) твердой фазе. Разная степень заполнения поры флюидом показана сплошным цветом. Предполагаем, что при неполном флюидонасыщении смачиваемость стенок пор и свойства флюида таковы, что последний образует стабильную пленку на поверхности пор, разной толщины в зависимости от степени насыщения. Тогда можно предложить следующую концепцию возникновения комбинационных гармоник, представленную на рисунке в

виде сосредоточенных электрических параметров. При строгом подходе замена объемных электромагнитных действующих сил и свойств среды сосредоточенными параметрами не правомочна. Но можно рассматривать вместо объемных величин их поверхностную плотность, а сосредоточенные параметры рассматривать, как отнесенные к единице площади поверхности разделов сред твердое тело — жидкость и жидкость — газ. Тогда ограничимся рассмотрением цилиндра малого сечения (много меньшим поперечного сечения поры), ось которого соответствует пунктиру на рисунке.

Пусть на границе жидкой и твердой фаз в двойном электрическом слое в результате возбуждения упругим полем действует «источник» стороннего тока  $I^{ex}(S(f))$ , где  $S$  — параметр, характеризующий упругое воздействие (например, смещение жидкой фазы относительно твердой), а  $f$  — частота такого воздействия. Содержимое поры может быть представлено некоторым «сопротивлением»  $R$ .



Модель для пояснения механизма возникновения комбинационных гармоник. В верхнем ряду слева направо показаны три стадии разной степени флюидонасыщения эллипсоидной поры, находящейся в слабо проводящей твердой фазе. В нижнем ряду показаны соответствующие эквивалентные схемы в сосредоточенных параметрах для тока, протекающего вдоль штриховой линии. Пояснения остальных обозначений см. в тексте

A model to explain the mechanism of occurrence of combination harmonics. The top row from left to right shows three stages of varying degrees of fluid saturation for ellipsoid pore in weakly conducting solid phase. The bottom row shows corresponding equivalent electrical circuits in lumped parameters for current flowing along dashed line. See the text for explanations of other symbols

При уменьшении флюидонасыщенности количество флюида в поре уменьшается и образует слой (пленку) на поверхности поры некоторой толщины, которая в общем случае зависит от формы поры, свойств поверхности поры, смачивающего флюида и вещества каркаса. При упругом воздействии продолжит действовать «источник» стороннего тока  $I^{ex}(S(f))$ , хотя величина его может измениться в силу изменения характера взаимодействия флюид–каркас.

Незаполненная (точнее, заполненная воздухом или газом) часть поры может быть в этом случае представлена «емкостью»  $C(S(f))$ . Величина этой емкости зависит от диэлектрической проницаемости газа, расстояния между границами газ-жидкость и эффективной площади поверхности границы газ-жидкость. Здесь важно отметить, что при упругом воздействии будет происходить не только смещение жидкой и твердой фаз друг относительно друга, но и колебание поверхности газ-жидкость. Это приведет к колебанию величины «емкости»  $C(S(f))$ .

При уменьшении количества флюида в поре до нуля «источник» стороннего тока  $I^{ex}(S(f))$ , обусловленный электрокинетическими процессами, исчезнет. В то же время «емкость»  $C(S(f))$  останется, ее колебания также сохранятся, но будут обусловлены колебаниями стенок поры. Если в среде останутся другие частично или полностью заполненные флюидом поры, где возникают источники стороннего тока электрокинетического происхождения, то «емкость» будет оказывать влияние на распределение электромагнитного поля.

Поскольку «сопротивление»  $R$  и «емкость»  $C(S(f))$  оказывают влияние на электромагнитное поле вне зависимости от его происхождения, то комбинационные частоты в такой модели могут возникать в двух случаях. Первый предполагает одновременное возбуждение полей

разных типов, электрического и упругого, на двух разных частотах  $f_1$  и  $f_2$  соответственно. Тогда упругое поле будет заставлять колебаться «емкость»  $C(S(f))$  на частоте  $f_2$ . Поскольку электрическое поле в среде зависит от емкости и сопротивления, то возникнет модулирующее воздействие на величину электрического поля. Это приведет к появлению в его спектре комбинационных гармоник на частотах  $f_1 \pm f_2$  при условии  $f_1 \gg f_2$ .

Второй случай реализуется при одновременном возбуждении поля одного типа, например, только упругого, на двух разных частотах  $f_1$  и  $f_2$ . Если сам по себе сейсмoeлектрический эффект 2-го рода линеен, то при полном флюидонасыщении возникнет электрическое поле в виде суперпозиции (суммы) двух волн на частотах  $f_1$  и  $f_2$ . При частичном флюидонасыщении упругие поля будут не только возбуждать электрическое поле, но и создавать колебания «емкости»  $C(S(f))$  на частотах  $f_1$  и  $f_2$ . Если частоты  $f_1$  и  $f_2$  различаются существенно, например,  $f_1 \gg f_2$ , то высокочастотная упругая волна будет эффективнее поглощаться средой. Низкочастотная волна будет поглощаться слабее, ее влияние на колебание «емкости» будет определяющим. В то же время, она будет возбуждать меньшее по величине вторичное электрическое поле, так как эффективность сейсмoeлектрического эффекта 2-го рода увеличивается с ростом частоты (по данным лабораторных исследований [36]). В результате возникнет электрическое поле с комбинационными гармониками  $f_1 \pm f_2$ .

Наконец, возможна ситуация параметрического резонанса — когда вынуждающее воздействие (здесь — возбуждающее упругое) оказывается в резонансе с собственными колебаниями электрической системы, которая здесь включает в себя «емкость» и «сопротивление». При этом значительная часть энергии возбуждающего воздействия может уходить в

энергию электрического поля на комбинационных частотах. Такое объяснение представляется вполне допустимым для наблюдавшихся в лабораторных условиях явлений, напоминающих параметрический резонанс [42].

В реальной ситуации спектральный состав и распределение вторичного электрического поля при комбинированном воздействии будет сложнее, чем дает вышеописанная модель. Например, здесь не учитывается сейсмoeлектрический эффект первого рода, который будет оказывать влияние на «сопротивление» пористой среды. Также, не учитывается разный размер пор и их разный отклик на упругое воздействие. В рамках этой модели рассматривается только один масштабный уровень пор, а слабая проводимость твердого скелета может быть обусловлена как собственной проводимостью твердой фазы, так и наличием флюида в порах существенно меньшего масштабного уровня, по сравнению с рассматриваемой эллипсоидальной порой на рисунке.

### Способы экспериментального наблюдения нелинейности

Возможные способы экспериментального наблюдения нелинейности зависят от управляющих параметров, которые определяют свойства среды и проявление нелинейности, а также от регистрируемых параметров возбуждающих и вторичных полей.

Определим первоначально экспериментальные критерии нелинейности с точки зрения возбуждающих и вторичных полей. Введем обозначения экспериментально задаваемых или измеряемых величин:

$E_{\text{meas}}$  и  $E_{\text{gen}}$  — соответственно, измеряемая и задаваемая напряженность электрического поля, может быть определена и задана традиционным способом как разность потенциалов между двумя электродами;

$j_{\text{meas}}$  — измеряемая плотность тока электрического поля, может быть определена по магнитному действию тока;

$S_{\text{gen}}$  — амплитуда колебаний возбуждаемого упругого поля, которая определяется параметрами возбуждающего устройства (например, пьезопреобразователя) и условиями возбуждения.

Под нелинейностью в противоположность линейности будем понимать несколько свойств механоэлектрического преобразования:

1. Нарушение линейной зависимости величины вторичного поля механоэлектрического преобразования от величины возбуждающего воздействия («амплитудная» нелинейность):

$$E_{\text{meas}}(\alpha \cdot S_{\text{gen}}) \neq \alpha \cdot E_{\text{meas}}(S_{\text{gen}}), \quad (9)$$

где  $E_{\text{meas}}(S_{\text{gen}})$  здесь и далее — измеренная величина вторичного электрического поля, возбуждаемого упругим полем величиной  $S_{\text{gen}}$  в исследуемом объеме среды. То же самое может быть записано в виде:

$$K = E_{\text{meas}}/S_{\text{gen}} = \text{func}(S_{\text{gen}}) \neq \text{const}, \quad (10)$$

где  $K$  — коэффициент механоэлектрического преобразования (КМЭП).

2. Нарушение аддитивности вторичных полей механоэлектрического преобразования («аддитивная» нелинейность) в исследуемом объеме среды:

$$E_{\text{meas}}(S_{\text{gen1}} + S_{\text{gen2}}) \neq E_{\text{meas}}(S_{\text{gen1}}) + E_{\text{meas}}(S_{\text{gen2}}). \quad (11)$$

Аддитивность и, соответственно, ее нарушение можно рассматривать во временной и в частотной области:

2.1. нелинейность во временной области:

$$E_{\text{meas}}(S_{\text{gen1}} + S_{\text{gen2}}, t_1) \neq E_{\text{meas}}(S_{\text{gen1}}, t_1) + E_{\text{meas}}(S_{\text{gen2}}, t_1), \quad (12)$$

где  $t_1$  — выбранный момент времени.

2.2. нелинейность в частотной области:

$$E_{\text{meas}}(S_{\text{gen}}(f_1) + S_{\text{gen}}(f_2)) \neq E_{\text{meas}}(S_{\text{gen}}(f_1)) + E_{\text{meas}}(S_{\text{gen}}(f_2)), \quad (13)$$

где  $f_1$  и  $f_2$  — две различные частоты возбуждающего упругого поля.

3. Нарушение линейной связи между электрическими величинами при механоэлектрическом преобразовании («нарушение» закона непрерывности полного тока или «нарушение» закона Ома):

$$j_{\text{meas}0} \neq \sigma \cdot E_{\text{meas}} - j^{\text{ex}}, \quad (14)$$

где удельная проводимость  $\sigma$  определяется при отсутствии возбуждающего упругого воздействия из закона Ома:

$$j_{\text{meas}0} = \sigma \cdot E_{\text{gen}}. \quad (15)$$

Выражение (14) противоположно к выражению (4а) по двум причинам. Во-первых, (4а) вводится для локальной области среды с размерами, сопоставимыми с масштабом усреднения параметров среды. Особенно это важно для определения плотности стороннего тока  $j^{\text{ex}}$ . Плотность тока  $j_{\text{meas}}$  и напряженность электрического поля  $E_{\text{meas}}$  в исследуемом объеме могут быть измерены только на базе, существенно большей масштаба усреднения. Поэтому сейсмоэлектрический эффект 2-го рода «внутри» измерительной базы будет приводить к нарушению выражения (4а). Во-вторых, проводимость  $\sigma$ , определяемая по (15), не учитывает сейсмоэлектрический эффект 1-го рода, который будет возникать при упругом воздействии независимо от сейсмоэлектрического эффекта 2-го рода. Условие (14) также может быть написано отдельно для временной и частотной областей.

С точки зрения проявления нелинейности в зависимости от управляющих параметров, существенными представляются условия (2), (3), а также степень флюидонасыщения пористой среды. Вернемся к уравнениям (5а)–(5б). В [26] с учетом допущения (6) получено выражение для плотности стороннего тока:

$$j^{\text{ex}} = i \cdot \omega \cdot Z(\omega) \cdot (u_s - u_f), \quad (16)$$

$$Z(\omega) = \frac{\phi \cdot \eta \cdot L(\omega)}{k(\omega)}, \quad (17)$$

где  $Z(\omega)$  — частотнозависимый коэффициент, связывающий сторонний ток и движение флюида относительно каркаса и зависящий от электрокинетических, электрохимического и фильтрационно-емкостных характеристик среды. В [6] получено альтернативное выражение для указанного коэффициента:

$$Z(\omega) = \theta \cdot Q(\omega), \quad (18)$$

где  $\theta$  — удельная поверхность порового пространства,  $Q(\omega)$  — частотнозависимая поверхностная плотность заряда на поверхности раздела твердой и жидкой фаз.

Очевидно, что  $Z(\omega)$  и сторонний ток несут информацию о важнейших петрофизических характеристиках пористой среды. Поэтому именно сторонний ток должен является основным объектом изучения при исследовании механоэлектрических преобразований.

В [Svetov et al., 1999] отмечено, что принимаемое в некоторых работах допущение о равенстве нулю полного тока в (1), т.е. когда ток проводимости полностью определяется плотностью стороннего тока, в общем случае несправедливо. Экспериментальное разделение полного тока, тока проводимости и стороннего тока — сложная задача, зависящая от конкретной лабораторной методики исследования сейсмоэлектрических эффектов, но решение ее возможно [49]. Разработке подходящей методики для лабораторных исследований посвящено отдельное направление работа авторов. Отметим, что разделение вторичных волн по типу источника в задачах физики связанных полей разной природы, к которым относятся и механоэлектрические преобразования, является весьма актуальной проблемой, которой посвящены экспериментальные [28, 40], модельные [53] и теоретические [54] исследования.

Если задача разделения токов решена, то нелинейность по (14) может быть обусловлена неравномерностью распре-

деления величины стороннего тока  $j^{\text{ex}}$  на измерительной базе.

Во-первых, к этому может приводить неравномерное распределение всех определяющих его по (9) и (10) электрокинетических, электрохимических и фильтранционно-емкостных свойств среды.

Во-вторых, к этому приводит нарушение условий (2) и (3) — если внутри измерительной базы нельзя пренебречь влиянием градиента концентрации и температуры, то вывод выражения (9) становится неверным,  $j^{\text{ex}}$  сложным образом зависит от этих градиентов.

Наконец, в-третьих, влияние степени флюидонасыщения пористой среды, если поры заполнены флюидом неполностью или их заполнение неравномерно на измерительной базе, напрямую определяет применимость самой электрокинетической теории для нахождения  $j^{\text{ex}}$ .

Все эти особенности могут привести к нелинейному проявлению механоэлектрических преобразований с точки зрения экспериментатора.

При неполной степени насыщения порового пространства флюидом, на первый план выходит проявление «амплитудной» и «аддитивной» нелинейности. «Амплитудная» нелинейность может быть связана с ситуацией, когда малостью диффузной части двойного электрического слоя нельзя пренебречь по сравнению с размером пор или по сравнению с толщиной пленки флюида, смачивающей внутреннюю поверхность поры. Флюид, обладающий хорошей смачиваемостью к твердой фазе, первоначально распределяется по внутренней поверхности пор, образуя тонкую пленку. Соответственно, заполнение малых пор происходит раньше. Конечно, такая идеализация не учитывает неравномерность проникновения флюида в поровое пространство, но качественно показывает, что неполное насыщение больших пор и заполнение малых пор происходит параллельно. Если

при упругом воздействии смещение жидкой фазы относительно твердой окажется сопоставимым с толщиной диффузной части двойного диэлектрического слоя и, следовательно, с толщиной пленки в больших порах или размером малых пор, то появится нормальная к поверхности поры составляющая электрического поля. Ожидаемый порядок величины амплитуды упругих колебаний, чтобы наблюдать «амплитудную» нелинейность, может быть оценен в  $10^{-8}$  мм.

«Аддитивная» нелинейность также может проявляться при неполном заполнении пор флюидом. Для этого необходимо, чтобы колебания «емкости», связанной с внутренним пространством поры (см. рисунок), были сопоставимы с самой величиной емкости. Это можно ожидать в случае сильно уплощенных эллипсоидных (дискообразных) пор с малым аспектным соотношением — малым отношением меньшего поперечного размера поры (ширины) к большему (длины). Площадь обкладки эквивалентного конденсатора оказывается большой, а амплитуда колебаний границ жидкой и газовой фазы — сопоставима с расстоянием между этими границами у противоположных стенок поры. Наиболее просто представить наблюдение «аддитивной» нелинейности при возбуждении двух упругих воздействий на разных частотах, отличающихся в несколько раз. Упругое воздействие на большей (несущей) частоте будет осуществлять возбуждение вторичного электрического поля, а воздействие на меньшей (модулирующей) частоте будет определять колебания емкости. Становится возможным наблюдение комбинационных частот и параметрического резонанса.

Рассматривая возможные способы и типы задания возбуждающих и управляющих параметров, а также способов измерения вторичных полей, можно составить таблицу их комбинаций и соответствующих наблюдаемых особенностей, сви-

Таблица 2

**Возможные типы возбуждаемых, управляющих и исследуемых параметров**  
**Possible types of excited, controlled and investigated parameters**

Возбуждающий сигнал / варьируемый параметр	Управляющий параметр	Исследуемый параметр / тип нелинейности
Один гармонический / амплитуда	Степень флюидонасыщения, частота возбуждающего воздействия	Коэффициент механоэлектрического преобразования (КМП) по (10) / «амплитудная»
Два гармонических / частота	Степень флюидонасыщения	Спектр КМП / «аддитивная»
Один гармонический	Неравномерное насыщение флюидом, градиент концентрации, градиент температуры	Напряженность поля и плотность тока / «нарушение» закона Ома
Два импульсных (цуги колебаний) / разность времен, контролирующая место наложения колебаний	Неравномерное насыщение флюидом, градиент концентрации, градиент температуры, разные характеристики порового пространства	Пространственная зависимость КМП / «аддитивная»
Один прямоугольный импульс / амплитуда и длительность	Степень флюидонасыщения, концентрация растворенных веществ	Релаксация вторичного электрического поля / «нарушение» закона Ома

детельствующих о нелинейности механоэлектрического преобразования (табл. 2).

Экспериментальная методика, позволяющая выявить нелинейность, должна обладать специфическими особенностями:

- возможность двухчастотного возбуждения упругого поля;
- возможность одновременного измерения тока (для определения полной плотности тока) и разности потенциалов (для определения напряженности электрического поля);
- измерение на нескольких базах и высокая временная разрешающая способность при импульсном возбуждении;
- возможность соотнесения результатов лабораторных исследований с полевыми.

Такая методика требует отдельной разработки и является направлением дальнейшей работы авторов.

### **Заключение**

В статье анализируются теоретические предпосылки к возможности существования нелинейных механоэлектри-

ческих явлений в пористых средах при малых величинах воздействующих упругих полей.

Проведен обзор явлений, относящихся к преобразованию энергии механического поля в энергию электромагнитного поля. Произведена типизация явлений по степени насыщенности среды механической энергией и типу возбуждаемого вторичного поля. Отмечено, что нелинейность механоэлектромагнитных явлений при разрушении горных пород активно изучается, а нелинейность механоэлектрических явлений при малом механическом переменном воздействии (упругие колебания) в пористых средах исследована слабо. Под механоэлектрическими явлениями в работе понимаются не только сейсмоэлектрический эффект 2-го рода в пористых насыщенных средах, но и сейсмоэлектрический эффект 1-го рода, механоэлектрические преобразования в пористых средах с неполным насыщением флюидом, пьезоэлектрический эффект во взаимосвязи друг с другом.

Рассмотрены основные известные положения теории сейсмоэлектрических

эффектов, базирующейся на теории Био и Онзагера, ее применения для частных моделей, а также важные выводы, в частности — существование «быстрых» и «медленных» вторичных электромагнитных волн. Отмечено, что большинство разработанных теоретических моделей редуцируется до линейного вида, с определенными допущениями. Рассмотрены результаты экспериментальных исследований, свидетельствующие о возможной нелинейности. К ним можно отнести особенности механоэлектрических преобразований в неполностью насыщенных флюидом средах, наблюдение комбинационных гармоник и параметрического резонанса.

Проведен анализ теории сейсмоэлектрических эффектов с точки зрения возможных источников нелинейности. Показано, что к нелинейности могут приводить, прежде всего, те особенности традиционных моделей, влиянием которых обычно пренебрегают. Это градиент температуры, градиент концентрации растворенных во флюиде веществ, а также обратное влияние вторичного электрического поля на упругое. Последнее в общем случае требует решения самосогласованных задач, и может приводить к видимому нарушению линейных законов, связывающих сами по себе электрические (закон Ома) и упругие (закон Гука) величины. Показано, что экспериментальное наблюдение «нарушения» закона Ома требует отдельного определения полного тока, тока проводимости и стороннего тока электрокинетической природы, связанного с упругим воздействием.

Отмечено, что основные положения теории базируются на предположении о возможности эффективного усреднения среды (однородная двухфазная среда), в то время возможно существование неоднородностей на всех масштабах рассмотрения среды, согласно концепции

блочной-иерархического строения геофизической среды академика М.А. Садовского. Отсюда, с одной стороны, следует возможность существования «быстрых» волн в реальной геофизической среде в силу обязательного наличия неоднородностей. С другой стороны, возможно существование нормальной к поверхности двойного электрического слоя составляющей электрического поля в порах малых размеров, сопоставимых с толщиной диффузной части этого слоя. Указано на возможность сложных нелинейных механоэлектрических преобразований в средах, одновременно анизотропных по упругим, электромагнитным и петрофизическим свойствам.

Для объяснения комбинационных гармоник и параметрического резонанса как нелинейных явлений рассмотрена модель частично заполненной флюидом поры. Показано, что в таком случае возможно возникновение модуляции упругим воздействием электрических параметров, а именно емкости, связанной с пустым пространством в поре. Такая модуляция может наблюдаться экспериментально, если раздельно на разных частотах возбуждаются несущее электрическое и модулирующее упругое поля, а также если возбуждаются два упругих воздействия.

Сформулированы три критерия нелинейности с точки зрения экспериментально определяемых параметров: «амплитудная» нелинейность, «аддитивная» нелинейность и «нарушение» закона Ома. Определено, какие внешние по отношению к возбуждающему воздействию параметры управляют проявлением указанных нелинейностей. Произведена классификация типов возбуждающих сигналов, управляющих параметров и соответствующих проявлений нелинейности. Определены базовые требования к экспериментальной методике исследования нелинейностей.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А. Г. Сейсмоэлектрический эффект 1 рода в приэлектродных областях // Доклады АН СССР. — 1949. — Т. 68. — С. 53—56.
2. Иванов А. Г. Сейсмоэлектрический эффект 2 рода // Известия АН СССР. Серия географическая и геофизическая. — 1940. — № 5. — С. 699—727.
3. Френкель Я. И. К теории сейсмических и сейсмоэлектрических явлений во влажной почве // Известия АН СССР. Серия географическая и геофизическая. — 1944. — Т. 8. — № 4. — С. 133—150.
4. Терентьев В. Г. Исследование сейсмоэлектрического эффекта второго рода в лабораторных условиях // Записки Горного института. — 1992. — Т. 130. — С. 13—17.
5. Pride S. R. Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media // Phys. Review. Bull., 1994, Vol. 50., pp. 15678—15696.
6. Svetov B. S. and Gubatenko V. P. Electromagnetic field of electromechanical origin in water-saturated porous rocks. 1. formulation of the problem // Izvestiya. Physics of the Solid Earth, 1999, vol. 35, no 10, pp. 854—860.
7. Biot M. A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solids. I. Low-Frequency Range // J. Acoustic. Soc. Amer., 1956a, Vol. 28, pp. 168—178.
8. Biot M. A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solids. II. Higher Frequency Range // J. Acoustic. Soc. Amer., 1956b, Vol. 28, pp. 179—191.
9. Гохберг М. Б., Моргунов В. А., Похотелов О. А. Сейсмоэлектромагнитные явления. — М.: Наука, 1988. — 174 с.
10. Соболев Г. А., Демин В. М. Механоэлектрические явления в Земле. — М.: Наука, 1980. — 215 с.
11. Oprin V. N., Yakovitskaya G. E., Vostretsov A. G., Seryakov V. M. and Krivetsky A. V. Mechanical-electromagnetic transformations in rocks on failure // Journal of Mining Science, 2013, vol. 49, no 3, pp. 343—356. DOI: 10.1134/S1062739149030015.
12. Новацкий В. Электромагнитные эффекты в твердых телах. — М.: Мир, 1986. , 159 p.
13. Воробьев А. А. Физические условия залегания и свойства глубинного вещества. — Томск: Изд. Томского университета, 1975. — 298 с.
14. Здоров А. Г., Моргунов В. А. Общие закономерности фоновых вариаций ЭМИ на Кавминводском полигоне // Геофизические исследования. — 2005. — Вып. 4. — С. 50—60.
15. Шталин С. Г., Гордеев В. Ф., Малышков С. Ю., Поливач В. И., Малышков Ю. П. Регистратор импульсных электромагнитных полей для мониторинга геодинамических процессов и геофизической разведки // Датчики и системы. — 2012. — № 4. — С. 32—37.
16. Gershenson N. I. and Gokhberg M. B. On the Origin of ULF Magnetic Disturbances Prior to the Loma Prieta Earthquake // Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 1994, vol. 2, pp. 19—24.
17. Alekseev D. A. and Gokhberg M. B. On the Possibility of Estimation of the Earth Crust's Properties from the Observations of Electric Field of Electrokinetic Origin, Generated by Tidal Deformation within the Fault Zone // Izvestiya: Physics of the Solid Earth, 2018, vol. 54, no 3, pp. 487—503. DOI: 10.1134/S1069351318030023.
18. Parrot M., Achache J., Berthelier J. J., Blanc E., Deschamps A., Lefeuvre F., Menvielle M., Plantet J. L., Tarits P. and Villain J. P. High-frequency seismo-electromagnetic effects // Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1993, Vol. 77, Iss. 1—2, pp. 65—83.
19. Новацкий В. Динамические задачи термоупругости. — М.: Мир, 1970. , 256 p.
20. Fredrich J. T., Wong T.-F. Micromechanics of thermally induced cracking in three crustal rocks // J. of Geophys. Research, 1986, Vol. 91, no B12, pp. 12743—12764.
21. Gyulai Z., Hartly D. Elektrische Leitfähigkeit verformter Steinsalzkristalle // Zeitschrift für Physik, 1928, Vol. 51, no 5/6, pp. 378—387.
22. Martin R. J., Wyss M. Magnetism of rock and volumetric strain in failure tests // PAGEOPH, 1975, Vol. 113, no 1/2, pp. 51—61.
23. Волярович М. П., Пархоменко Э. И. Пьезоэлектрический эффект горных пород // Доклады АН СССР. — 1954. — Т. 99. — № 2. — С. 239—242.
24. Rzhhevskiy V. V., Yamshchikov B. C., Shkuratnik V. L. Thermoemission effects of rock memory // Doklady Akademii Nauk SSSR, 1985, vol. 283, no 4, pp. 843—845.
25. Манштейн А. К., Нестерова Г. В., Филатов В. В., Саева О. П. Об оценке величины сейсмоэлектрического эффекта первого рода // Технологии сейсморазведки. — 2013. — № 4. — С. 81—88.

26. Светов Б. С. Основы геоэлектрики. — М.: ЛКИ, 2008. , 656 p.
27. Бобровников Л. З., Бобылов Ю. А., Головин С. В., Добрынин С. И. Инновационные геофизические технологии в нефтегазовой геологоразведке // Научный журнал Российского газового общества. — 2015. — № 2–3. — С. 20–34.
28. Smeulders D., Grobbe N., Heller K., Schakel M. Seismoelectric Conversion for the Detection of Porous Medium Interfaces between Wetting and Nonwetting Fluids // Vadose Zone Journal, 2014, Vol. 13. DOI: 10.2136/vzj2013.06.0106.
29. Сафонов А. С. Электродинамическая сейсморазведка или сейсморазведка с регистрацией электромагнитных составляющих волнового поля. — М.: ВНИГНИ, 2017. , 152 p.
30. Потапов О. А., Лизун С. А., Кондрат В. Ф., Лящук Д. Н., Грозденский В. А., Сейфуллин Р. С., Ермаков Б. Д., Портнягин Н. Э. Основы сейсмoeлектроразведки. — М.: Недра, 1995. — 268 с.
31. Анцыферов М. С. Электросейсмический эффект // Доклады АН СССР. — 1962. — № 6. — С. 1295–1297.
32. Volkova E. N., Kamshilin A. N. Excitation of geoelectric oscillations and alteration of ground conductivity by a vibration generator // Doklady of the Academy of Sciences of the USSR, Earth Science Sections, 1988, Vol. 302, no 5, pp. 54–56.
33. Петкевич Г. И., Лящук Д. Н., Лизун С. А., Кондрат В. Ф. Геоэлектрические исследования полей, стимулированных вибровоздействием в неоднородных средах / Нетрадиционные методы геофизических исследований неоднородностей в земной коре. — М., 1989. — С. 72–73.
34. Пархоменко Э. И. Основные закономерности сейсмoeлектрического эффекта осадочных пород и пути его использования в геофизике / Физические свойства горных пород и минералов при высоких давлениях и температурах. — М.: Наука, 1978. — С. 200–207.
35. Черняк Г. Я. Электромагнитные методы в гидрогеологии и инженерной геологии. — М.: Недра, 1987. — 165 с.
36. Ageeva O. A., Svetov B. S., Sherman G. Kh. and Shipulin S. V. Seismoelectric effect of second kind in rocks from data of laboratory studies // Russian Geology and Geophysics, 1999, vol. 40, no 8, pp. 1251–1257.
37. Kamshilin A. N., Volkova E. N., Kuzichkin O. R. and Sokolnikov M. A. Self-oscillations in rocks, results of laboratory experiments // Annals of geophysics, Vol. 47, no 1 (feb. 2004), pp. 93–100.
38. Агеева О. А. Использование сейсмoeлектрических преобразований в породах для прогнозирования характера насыщения порового пространства // Геофизика. — 2008. — № 1. — С. 1621.
39. Волкова Е. Н., Камшилин А. Н. Механoeлектрические преобразователи / Горная геофизика. Международная конференция 22–25 июня 1998 г., С. Петербург, Россия. Сборник трудов. — СПб.: ВНИИМИ, 1998. — С. 486–488.
40. Bordes C., Sénéchal P., Barrière J., Brito D., Normandin E., Jougnot D. Impact of water saturation on seismoelectric transfer functions: a laboratory study of coseismic phenomenon // Geophysical Journal International, 2015, Vol. 200, Iss. 3, pp. 1317–1335. DOI: 10.1093/gji/ggu464.
41. Gul'yel'mi A. V., Kamshilin A. N., Volkova E. N. and Chirkov E. B. Seismic vibrator excitation of geoelectric signals at combination frequencies // Transactions (doklady) of the USSR Academy of Sciences. Earth science sections, 1989, vol. 309, no 6, pp. 19–21.
42. Камшилин А. Н. Параметрические сейсмoeлектрические явления / Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле: 19-я международная конференция. Материалы конференции. — М.: ИГЕМ РАН. 2018. — С. 153–156.
43. Чечурин С. Л. Параметрические колебания и устойчивость периодического движения. — Л.: Изд. ЛГУ, 1983. , 219 p.
44. Чеботарева И. Я., Камшилин А. Н. Исследование механoeлектрических преобразований в горных породах с малой степенью флюидонасыщения // Радиопромышленность. — 2018. — № 1. — С. 18–26. DOI: 10.21778/2413-9599-2018-1-18-26.
45. Шермергор Т. Д. Теория упругости микронеоднородных сред. — М.: Наука, 1977. — 400 p.
46. Садовский М. А. Избранные труды: Геофизика и физика взрыва. — М.: Наука, 2004. — 440 p.
47. Ivanov V. I. The probabilistic mechanism of formation of block structures // Doklady Physics, 2012, vol. 57, no 3, pp. 125–130. DOI: 10.1134/S1028335812030044.
48. Svetov B. S. Self-consistent problems of geophysics. A review // Izvestiya. Physics of the Solid Earth, 2015, vol. 51, no 6, pp. 910–914. DOI: 10.1134/S1069351315060117.

49. Казначеев П. А., Камшилин А. Н., Попов В. В. Измерение локальной плотности тока в земной коре // Вестник МЭИ. — 2011. — № 5. — С. 57–63.
50. Burdine N. T., Gournay L. S., Reichertz P. P. Pore Size Distribution of Petroleum Reservoir Rocks // Journal of Petroleum Technology, 1950, no 2 (07), pp. 195–204. DOI: 10.2118/950195-g.
51. Nimmo J. R. Porosity and Pore Size Distribution // In: Encycl. Soils Environ. — Elsevier, 2005. — Pp. 295–303. DOI: 10.1016/B0-12-348530-4/00404-5.
52. Zechen Y., Canshou Ch., Pengxian F., Mingyang W., Xiang F. Pore Structure Characterization of Ten Typical Rocks in China // The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2015, Vol. 20, bund. 2, pp. 479–494.
53. Kröger B., Yaramanci U., Kemna A. Numerical analysis of seismoelectric wave propagation in spatially confined geological units // Geophysical Prospecting, 2014, Vol. 62, DOI: 10.1111/1365-2478.12020.
54. Grobbe N., Neut J., Slob E., Wapenaar K., Almagro C. V., Drijkoningen G. Unified multi-depth-level field decomposition // Geophysical Prospecting, 2015, Vol. 64, DOI: 10.1111/1365-2478.12290. **ТАБ**

## REFERENCES

- Ivanov A. G. Seismoelectric effect of the 1st kind in near-electrode regions. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1949. Vol. 68, pp. 53–56. [In Russ].
- Ivanov A. G. Seismoelectric effect of the 2nd kind. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya geograficheskaya i geofizicheskaya*. 1940, no 5, pp. 699–727. [In Russ].
- Frenkel Ya. I. To the theory of seismic and seismoelectric phenomena in moist soil. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya geograficheskaya i geofizicheskaya*. 1944. Vol. 8, no 4, pp. 133–150. [In Russ].
- Terent'ev V. G. Studies of the second kind of seismoelectrical effect in laboratory. *Zapiski Gornogo instituta*. 1992. Vol. 130, pp. 13–17. [In Russ].
- Pride S. R. Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media. *Phys. Review. Bull.*, 1994, Vol. 50, pp. 15678–15696.
- Svetov B. S. and Gubatenko V. P. Electromagnetic field of electromechanical origin in water-saturated porous rocks. 1. formulation of the problem. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 1999, vol. 35, no 10, pp. 854–860.
- Biot M. A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solids. I. Low-Frequency Range. *J. Acoustic. Soc. Amer.*, 1956a, Vol. 28, pp. 168–178.
- Biot M. A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solids. II. Higher Frequency Range. *J. Acoustic. Soc. Amer.*, 1956b, Vol. 28, pp. 179–191.
- Gokhberg M. B., Morgunov V. A., Pokhotelov O. A. *Seismoelektromagnitnye yavleniya* [Seismoelectromagnetic phenomena], Moscow, Nauka, 1988, 174 p.
- Sobolev G. A., Demin V. M. *Mekhanoelektricheskie yavleniya v Zemle* [Mechanoelectric phenomena in the Earth], Moscow, Nauka, 1980, 215 p.
- Oparin V. N., Yakovitskaya G. E., Vostretsov A. G., Seryakov V. M. and Krivetsky A. V. Mechanical-electromagnetic transformations in rocks on failure. *Journal of Mining Science*, 2013, vol. 49, no 3, pp. 343–356. DOI: 10.1134/S1062739149030015.
- Novatskiy V. *Elektromagnitnye efekty v tverdykh telakh* [Electromagnetic effects in solids], Moscow, Mir, 1986, 159 p.
- Vorob'ev A. A. *Fizicheskie usloviya zaleganiya i svoystva glubinnogo veshchestva* [Physical conditions of occurrence and properties of deep matter], Tomsk, Izd. Tomskogo universiteta, 1975, 298 p.
- Zdorov A. G., Morgunov V. A. General regularities of electromagnetic radiation at the Kavminvod test area. *Geofizicheskie issledovaniya*. 2005. Issue 4, pp. 50–60. [In Russ].
- Shtalin S. G., Gordeev V. F., Malyshkov S. Yu., Polivach V. I., Malyshkov Yu. P. EM field recording unit for monitoring the geodynamic processes and geophysical prospecting. *Datchiki i sistemy*. 2012, no 4, pp. 32–37. [In Russ].
- Gershenson N. I. and Gokhberg M. B. On the Origin of ULF Magnetic Disturbances Prior to the Loma Prieta Earthquake. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 1994, vol. 2, pp. 19–24.
- Alekseev D. A. and Gokhberg M. B. On the Possibility of Estimation of the Earth Crust's Properties from the Observations of Electric Field of Electrokinetic Origin, Generated by Tidal

- Deformation within the Fault Zone. *Izvestiya: Physics of the Solid Earth*, 2018, vol. 54, no 3, pp. 487–503. DOI: 10.1134/S1069351318030023.
18. Parrot M., Achache J., Berthelier J.J., Blanc E., Deschamps A., Lefeuvre F., Menvielle M., Plantet J.L., Tarits P. and Villain J.P. High-frequency seismo-electromagnetic effects. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1993, Vol. 77, Iss. 1–2, pp. 65–83.
19. Novatskiy V. *Dinamicheskie zadachi termouprugosti* [Dynamic problems of thermoelasticity], Moscow, Mir, 1970, 256 p.
20. Fredrich J.T., Wong T.-F. Micromechanics of thermally induced cracking in three crustal rocks. *J. of Geophys. Research*, 1986, Vol. 91, no B12, pp. 12743–12764.
21. Gyulai Z., Hartly D. Elektrische Leitfähigkeit verformter Steinsalzkristalle. *Zeitschrift für Physik*, 1928, Vol. 51, no 5/6, pp. 378–387.
22. Martin R.J., Wyss M. Magnetism of rock and volumetric strain in failure tests. *PAGEOPH*, 1975, Vol. 113, no 1/2, pp. 51–61.
23. Volarovich M.P., Parkhomenko E.I. Piezoelectric effect in rocks. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1954. Vol. 99, no 2, pp. 239–242. [In Russ].
24. Rzhavskiy V.V., Yamshchikov B.C., Shkuratnik V.L. Thermoemission effects of rock memory. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1985, vol. 283, no 4, pp. 843–845.
25. Manstein A.K., Nesterova G.V., Filatov V.V., Saeva O.P. Assessing magnitude of seismo-electric effect of the first kind. *Tekhnologii seysmorazvedki*. 2013, no 4, pp. 81–88. [In Russ].
26. Svetov B.S. *Osnovy geoelektriki* [Fundamentals of geoelectrics], Moscow, LKI, 2008, 656 p.
27. Bobrovnikov L.Z., Bobylov Y.A., Golovin S.V., Dobrynin S.I. Innovative geophysical technologies in oil and gas geological exploration. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo gazovogo obshchestva*. 2015, no 2–3, pp. 20–34. [In Russ].
28. Smeulders D., Grobbe N., Heller K., Schakel M. Seismoelectric Conversion for the Detection of Porous Medium Interfaces between Wetting and Nonwetting Fluids. *Vadose Zone Journal*, 2014, Vol. 13. DOI: 10.2136/vzj2013.06.0106.
29. Safonov A.S. *Elektrodinamicheskaya seysmorazvedka ili seysmorazvedka s registratsiyey elektromagnitnykh sostavlyayushchikh volnovogo polya* [Electrodynamic seismic or seismic with registration of electromagnetic components of the wave field], Moscow, VNIGNI, 2017, 152 p.
30. Potapov O.A., Lizun S.A., Kondrat V.F., Lyashchuk D.N., Grozdenskiy V.A., Seyfullin R.S., Ermakov B.D., Portnyagin N.E. *Osnovy seysmoelektrozvedki* [Fundamentals of seismic exploration], Moscow, Nedra, 1995, 268 p.
31. Antsiferov M.S. The electro-seismic effect. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1962, no 6, pp. 1295–1297. [In Russ].
32. Volkova E.N., Kamshilin A.N. Excitation of geoelectric oscillations and alteration of ground conductivity by a vibration generator. *Doklady of the Academy of Sciences of the USSR, Earth Science Sections*, 1988, Vol. 302, no 5, pp. 54–56.
33. Petkevich G.I., Lyashchuk D.N., Lizun S.A., Kondrat V.F. Geoelektricheskie issledovaniya polei, stimulirovannykh vibrovozdeistviem v neodnorodnykh sredakh [Geoelectrical studies of fields stimulated by vibration in inhomogeneous media]. *Netraditsionnye metody geofizicheskikh issledovaniy neodnorodnostei v zemnoi kore, Sbornik statey*, Moscow, 1989, pp. 72–73. [In Russ].
34. Parkhomenko E.I. The main regularities of the seismoelectric effect of sedimentary rocks and ways of its using in geophysics. *Physical properties of rocks and minerals at high pressures and temperatures, Sbornik statey*, Moscow, Nauka, 1978, pp. 200–207. [In Russ].
35. Chernyak G.Ya. *Elektromagnitnye metody v gidrogeologii i inzhenernoy geologii* [Electromagnetic methods in hydrogeology and engineering geology], Moscow, Nedra, 1987, 165 p.
36. Ageeva O.A., Svetov B.S., Sherman G.Kh., Shipulin S.V. Seismoelectric effect of second kind in rocks from data of laboratory studies. *Russian Geology and Geophysics*, 1999, vol. 40, no 8, pp. 1251–1257.
37. Kamshilin A.N., Volkova E.N., Kuzichkin O.R., Sokolnikov M.A. Self-oscillations in rocks, results of laboratory experiments. *Annals of geophysics*, Vol. 47, no 1 (feb. 2004), pp. 93–100.
38. Ageeva O.A. The use of seismoelectric transformations in reservoir rocks for pore space saturation. *Geofizika*. 2008, no 1, pp. 1621. [In Russ].
39. Volkova E.N., Kamshilin A.N. Mechano-electrical transformers. *Gornaya geofizika. Mezhdunarodnaya konferentsiya 22–25 June 1998*, Saint-Petersburg, Россия. Collection of scientific papers. Saint-Petersburg, VNIMI, 1998, pp. 486–488. [In Russ].

40. Bordes C., Sénéchal P., Barrière J., Brito D., Normandin E., Jougnot D. Impact of water saturation on seismoelectric transfer functions: a laboratory study of coseismic phenomenon. *Geophysical Journal International*, 2015, Vol. 200, Iss. 3, pp. 1317–1335. DOI: 10.1093/gji/ggu464.
41. Gul'yel'mi A. V., Kamshilin A. N., Volkova E. N. and Chirkov E. B. Seismic vibrator excitation of geoelectric signals at combination frequencies. *Transactions (doklady) of the USSR Academy of Sciences. Earth science sections*, 1989, vol. 309, no 6, pp. 19–21.
42. Kamshilin A. N. Parametricheskie seismoelektricheskie yavleniya [Parametrical seismoelectric phenomena]. *Fiziko-khimicheskie i petrofizicheskie issledovaniya v naukakh o Zemle: 19-ya mezhdunarodnaya konferentsiya. Materialy konferentsii*, Moscow, IGEM RAN. 2018, pp. 153–156. [In Russ].
43. Chechurin S. L. *Parametricheskie kolebaniya i ustoychivost' periodicheskogo dvizheniya* [Parametric oscillations and stability of periodic motion], Leningrad, Izd. LGU, 1983, 219 p.
44. 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. DOI: 10.21778/2413-9599-2018-1-18-26. [In Russ].
45. Shermergor T. D. *Teoriya uprugosti mikroneodnorodnykh sred* [Theory of elasticity of micro-inhomogeneous media], Moscow, Nauka, 1977. 400 p.
46. Sadovskiy M. A. *Izbrannye trudy: Geofizika i fizika vzryva* [Selected works: Geophysics and physics of explosion], Moscow, Nauka, 2004, 440 p.
47. Ivanov V. I. The probabilistic mechanism of formation of block structures. *Doklady Physics*, 2012, vol. 57, no 3, pp. 125–130. DOI: 10.1134/S1028335812030044.
48. Svetov B. S. Self-consistent problems of geophysics. A review. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2015, vol. 51, no 6, pp. 910–914. DOI: 10.1134/S1069351315060117.
49. Kaznachev P. A., Kamshilin A. N., Popov V. V., Measuring local current density in the Earth crust. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta*. 2011, no 5, pp. 57–63.
50. Burdine N. T., Gournay L. S., Reichertz P. P. Pore Size Distribution of Petroleum Reservoir Rocks. *Journal of Petroleum Technology*, 1950, no 2 (07), pp. 195–204. DOI: 10.2118/950195-g.
51. Nimmo J. R. Porosity and Pore Size Distribution. In: *Encycl. Soils Environ*. Elsevier, 2005. Pp. 295–303. DOI: 10.1016/B0-12-348530-4/00404-5.
52. Zechen Y., Canshou Ch., Pengxian F., Mingyang W., Xiang F. Pore Structure Characterization of Ten Typical Rocks in China. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, Vol. 20, bund. 2, pp. 479–494.
53. Kröger B., Yaramanci U., Kemna A. Numerical analysis of seismoelectric wave propagation in spatially confined geological units. *Geophysical Prospecting*, 2014, Vol. 62, DOI: 10.1111/1365-2478.12020.
54. Grobde N., Neut J., Slob E., Wapenaar K., Almagro C. V., Drijkoningen G. Unified multi-depth-level field decomposition. *Geophysical Prospecting*, 2015, Vol. 64, DOI: 10.1111/1365-2478.12290.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Казначеев Павел Александрович<sup>1</sup> — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, e-mail: p\_a\_k@mail.ru,  
 Камшилин Анатолий Николаевич<sup>1</sup> — канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник,  
<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.  
**Для контактов:** Казначеев П. А., e-mail: p\_a\_k@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

P.A. Kaznacheev<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, e-mail: p\_a\_k@mail.ru,  
 A.N. Kamshilin<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Phys. Mathem.), Leading Researcher,  
<sup>1</sup> Schmidt Institute of Physics of Earth of Russian Academy of Sciences, 123242, Moscow, Russia,  
**Corresponding author:** P.A. Kaznacheev, e-mail: p\_a\_k@mail.ru.