

## Особенности спектральных характеристик акустической эмиссии нефтенасыщенных горных пород

О.Л. Кузнецов<sup>1,\*</sup>, И.А. Чиркин<sup>1,†</sup>, В.П. Дыбленко<sup>2,‡</sup>, Р.Я. Шарифуллин<sup>2,‡</sup>, Е.Г. Ризанов<sup>1,§</sup>

<sup>1</sup>Международный университет природы, общества и человека «Дубна»,  
факультет естественных инженерных наук, кафедра общей и прикладной геофизики,  
Россия, 141980, Московская область, Дубна, Университетская, д. 19

<sup>2</sup>ООО «Научно-производственное предприятие Ойл-Инжиниринг»,  
Россия, 450096, Уфа, Шафиева, д. 44

(Статья поступила 11.11.2014; Подписана в печать 28.11.2014)

Проведены лабораторные и полевые сейсмоакустические исследования по влиянию внешних статистических и волновых возмущений на параметры акустических излучений из геологических сред. В ходе экспериментов осуществлялась непрерывная запись и компьютерная обработка сигналов акустической и сейсмоакустической эмиссии, возникающих в горной среде. Данные сигналы являются информативными параметрами напряженно-деформационного состояния среды и его изменения, с развитием новых полей трещиноватости и новых фильтрационных полей. Установлено существенное влияние флюида–порозаполнителя на характер и степень развития на микроуровне процессов трещинообразования, а также частотный спектр акустической эмиссии в горной среде. Нефтенасыщенная среда выделяет в ходе нагружения меньше энергии в виде излучения — как бы «аккумулируя» ее. Данный процесс сопровождается образованием скачкообразных метастабильных состояний, при этом в различных временных масштабах возникают циклы активности, в начале которых в короткие периоды «затишья» система находится в узловых точках «бифуркации». В них определяется дальнейший путь эволюции системы — либо с тенденцией нарастания упорядоченности и накоплением энергии, либо с нарастанием хаотичности и выделением внутренней энергии. Полученные результаты могут стать основой создания новых высокоэффективных инновационных технологий изучения и разведки недр Земли, а также сейсмоакустического воздействия на продуктивные пласты с целью повышения продуктивности скважин и увеличения нефтеотдачи пластов.

PACS: 93.85.Vc

УДК: 550.34.016, 550.34.013

Ключевые слова: акустическая эмиссия, порода, трещина, микросейсмь, фрактальность, волновое, сейсмоакустическое воздействие.

### ВВЕДЕНИЕ

Вопросы изменения состояния и свойств нефтегазо-водонасыщенных горных пород при акустических и сейсмоакустических, а также электромагнитных волновых воздействиях от техногенных и естественных источников в различных частотно-временных интервалах и энергетических уровнях рассмотрены нами и другими авторами в ряде работ, начиная с 60-х годов прошлого столетия [1–9].

Обобщение результатов многочисленных экспериментальных исследований, выполненных на образцах пород в лабораторных условиях и «in situ» в разрезах скважин и при полевых наблюдениях, позволяет отметить ряд основных положений, характеризующих геосреду и ее квазистойчивое состояние (аттракторы). К ним относятся: открытость геологической системы — геосреды, нелинейность характера геологических процессов и когерентность колебательных процессов, протекающих в ней на различных мас-

штабных уровнях и возникающая в результате самоорганизации нелинейных процессов. Модель среды «открытость–нелинейность–когерентность» необходима как для проведения экспериментальных исследований по созданию технологий оптимального воздействия на насыщенные горные породы с целью увеличения притока УВ-сырья, так и для интерпретации полученных результатов.

Сигналы АЭ и САЭ, возникающие в геосреде, являются информативными параметрами ее напряженно-деформационного состояния. Они отражают все явления, происходящие на различных масштабных уровнях структуры среды: деформационные, возникновение трещин, разрывов и сдвигов, образование и динамику различных неоднородностей, дислокаций, качественные превращения состояний структуры и т. д. Они также могут являться индикатором в целом текущего состояния геосреды и протекающих в ней различных процессов.

Геологическая нефтегазо-водонасыщенная среда представляет собой иерархию фрактальных структур самого различного масштаба. Напряженно-деформационное состояние и его изменение, с развитием новых полей трещиноватости и новых фильтрационных полей, определяется при взаимодействии микро- и макро структур, а также состоянием и физико-химическим взаимодействием всех трех фаз — твер-

\*E-mail: olk@uni-dubna.ru

†E-mail: iachirkin@gmail.com

‡E-mail: oilingin@ufanet.ru

§E-mail: geo@uni-dubna.ru

дого скелета породы, жидкого флюида и газа. Все происходящие при этом явления взаимосвязаны и взаимобусловлены.

Временные ряды АЭ также фрактальны и несут в себе важную информацию о текущем состоянии и свойствах среды. Качественная оценка указанных факторов возможна на основе фрактального анализа временных рядов АЭ (с анализом хода накопления энергии) и обработки сигналов АЭ и САЭ, зарегистрированных в различных точках среды. Стационарные характеристики временных рядов (среднее значение, дисперсия и автокорреляция) доминантно определяются такими геологическими параметрами, как пластовое давление, литология и тип насыщения (вода, газ, нефть), что позволяет определить их распределение в 3D-среде по результатам мониторинга эмиссии упругих волн.

Авторами проведен цикл лабораторных и полевых сейсмоакустических исследований геологических сред под воздействием внешних статистических и волновых возмущений. В ходе экспериментов осуществлялась непрерывная запись и компьютерная обработка сигналов акустической и сейсмоакустической эмиссии (АЭ и САЭ соответственно), возникающих в горной среде.

Использовался подход, который опирается на теорию динамических систем и математический аппарат фрактального анализа. Ниже кратко изложены специфика экспериментальных исследований в лабораторных, скважинных и полевых условиях и основные результаты этих исследований, отражающих особенности динамики состояния горных пород в условиях естественного залегания и при сейсмоакустическом воздействии (САВ).

## 1. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В лабораторных условиях исследовали поведение геологических сред в условиях задания различных внутренних напряжений под влиянием малых внешних возмущений. Помимо изменения статических механических напряжений создавали малые внешние возмущения волнового характера — низкочастотные упругие гармонические колебания в диапазоне от 5 Гц до 30 КГц и упругие импульсы заданной формы.

Были использованы керны терригенных и карбонатных пород в широком диапазоне изменения пористости и проницаемости, а также специально приготовленные искусственные керны — «клоны» с идентичными структурно-механическими и фильтрационно-ёмкостными характеристиками. Диапазон изменения проницаемости кернов —  $0 \div 0,150$  мкм<sup>2</sup>, пористости —  $0 \div 30$  %.

На рис. 1 и рис. 2 в качестве примера показаны характерные особенности изменения по времени функционала счета  $N^*$  — суммарного счета сигналов АЭ, полученные в результате программной обработки записей сигналов в процессе нагружения керна скв. 117 Су-

торминского месторождения ОАО «Ноябрьскнефтегаз» различной нефтенасыщенности, с проявлением точки бифуркации.

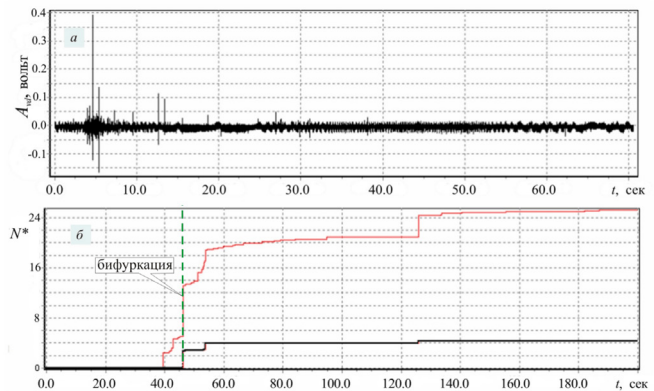


Рис. 1: Параметры функционала счета  $N^*$  сигналов АЭ, с выделением по фрактальности масштабного отношения в различных уровнях структуры. Нефтенасыщенность керна: 45%, начальная стадия нагружения

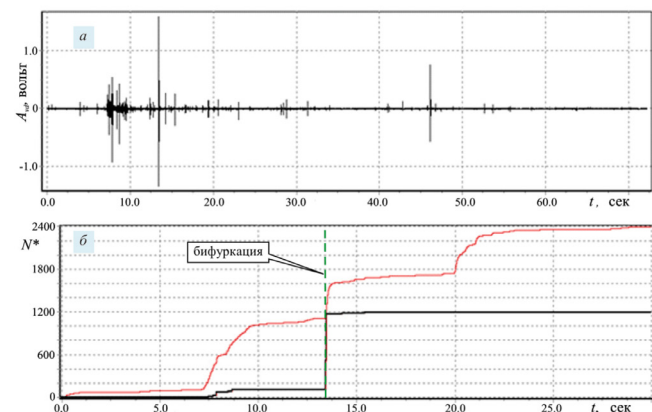


Рис. 2: Параметры функционала счета  $N^*$  сигналов АЭ, с выделением по фрактальности масштабного отношения в различных уровнях структуры. Нефтенасыщенность керна: 100%, начальная стадия нагружения

Проведенный анализ наблюдаемых сигналов АЭ позволяет провести достаточно четкое разделение полученных данных по различной насыщенности образцов. Наблюдается следующие существенные отличия характера излучения АЭ в нефтенасыщенных кернах под нагрузкой, по сравнению с «сухими» и водонасыщенными кернами — проявляется заметная частотная особенность акустической энергии, выделяемой нефтенасыщенной средой. Такая среда генерирует акустический сигнал, в котором низкочастотные гармоники преобладают по сравнению с сигналом из водонасыщенной среды, в особенности на начальном участке временного ряда, где энергия отклика, фиксируемая по АЭ, максимальна. Установлено существенное влияние флюида-порозаполнителя на характер и степень

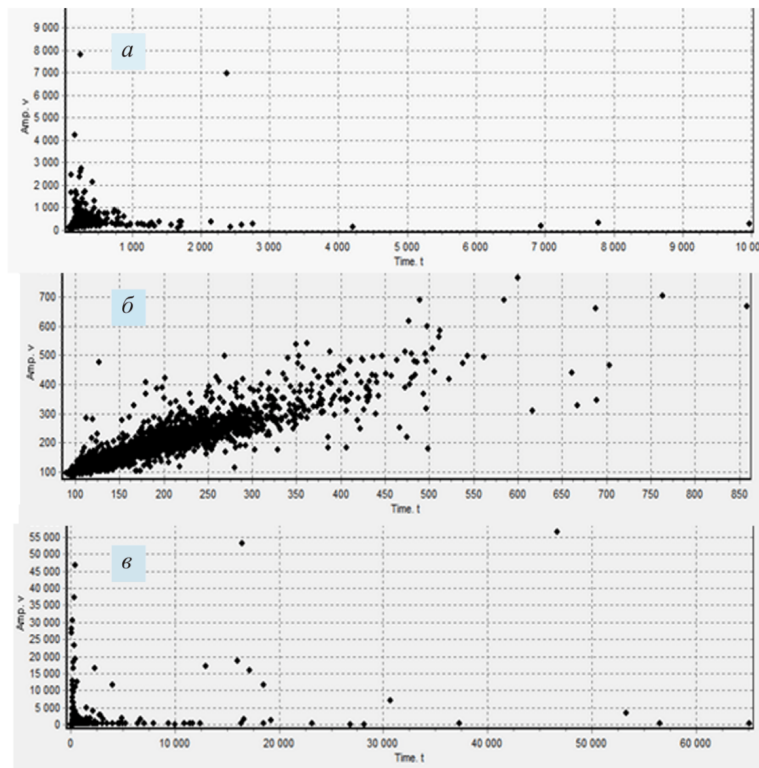


Рис. 3: Снимки аттракторов напряженного состояния геологической пластовой среды, полученные в ходе программной обработки акустических излучений на опытном участке нефтяного месторождения

развития на микроуровне процессов трещинообразования, а также частотный спектр излучения АЭ в горной среде. Нефтенасыщенная среда в ходе нагружения выделяет меньше энергии в виде АЭ — как бы «аккумулируя» ее. При этом процесс аккумуляции сопровождается образованием скачкообразных метастабильных состояний. Это состояние проходит через повторяющиеся в различных масштабах временные циклы активности, начало которых характеризуется короткими периодами «затишья», когда система находится в узловых точках «бифуркации» и определяется дальнейший путь её эволюции — либо с тенденцией нарастания упорядоченности и накоплением энергии, либо с нарастанием хаотичности и выделением внутренней энергии.

Данные точки привязаны как ко времени эволюции нефтенасыщенной геологической среды, так и к ее пространственному измерению.

## 2. ПОЛЕВЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Полевые экспериментальные наблюдения в режиме длительного мониторинга выполнены для изучения особенностей сигналов САЭ, возникающих в геологической среде

На рис. 3, в качестве примера, представлены выборки — «снимки» аттракторов напряженного состояния геологической пластовой среды в двумерном фазовом

пространстве, полученные по результатам специальной обработки временных рядов сигналов естественной САЭ из объёма терригенного коллектора, на опытном участке нефтяного месторождения. По полученным данным можно отметить, что состояние геологической среды периодически меняется — через временные фазы относительно устойчивого состояния (Рис 3а, в) и фазы неустойчивого напряженного состояния (рис. 3б).

Для изучения процессов микросейсмической эмиссии (МСЭ) в геологической среде авторами создана технология «Сейсмолокация очагов эмиссии» (СЛОЭ), которая позволяет выделить волны МСЭ (в наблюдаемом сейсмическом волновом поле) и позиционировать их в нижнем полупространстве.

Решение данных задач осуществляется на основе суперкратного накопления (более 106) сигналов МСЭ, регистрируемых при длительном непрерывном мониторинге, и локационного фокусирующего обзора заданного объема нижнего полупространства.

Выполненные экспериментальные исследования по технологии СЛОЭ в режиме длительного мониторинга на эталонном объекте — разрабатываемом нефтяном месторождении (в Оренбургской области) с более 40 скважинами, по которым информация типа насыщения, пластового давления, литофациальном составе продуктивной толщи являлась своеобразным тестом для оценки соответствия физических (кинематических

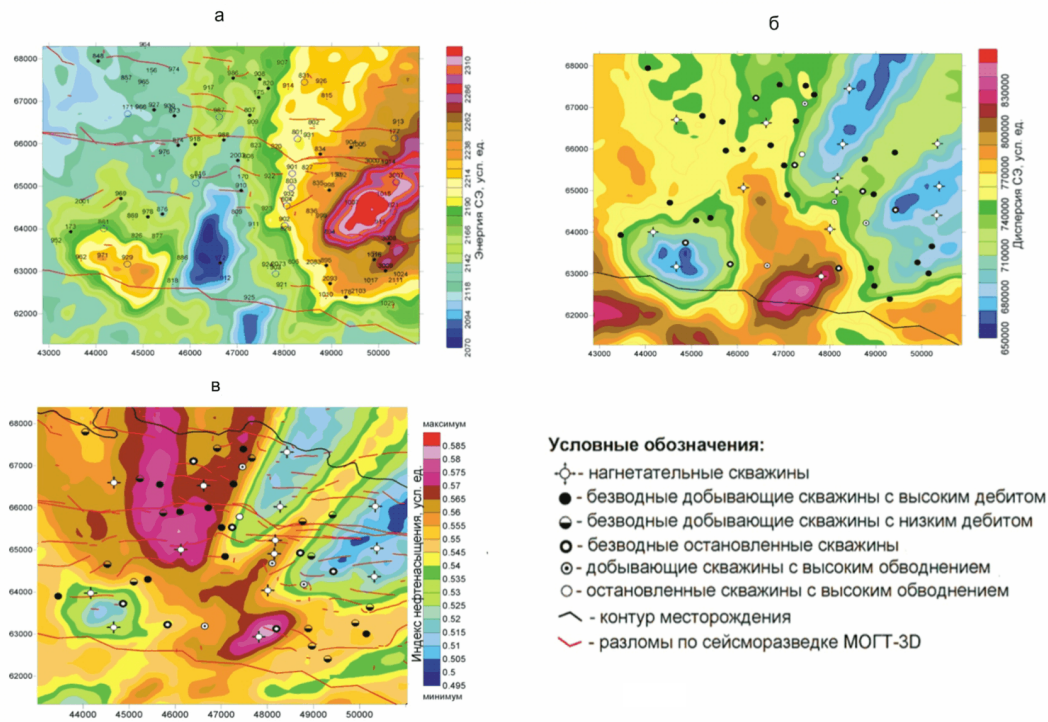


Рис. 4: Карты стационарных характеристик случайного процесса изменения энергии МСЭ: а) среднее значение; б) дисперсия; в) автокорреляция. Росташинское месторождение, Оренбургская обл

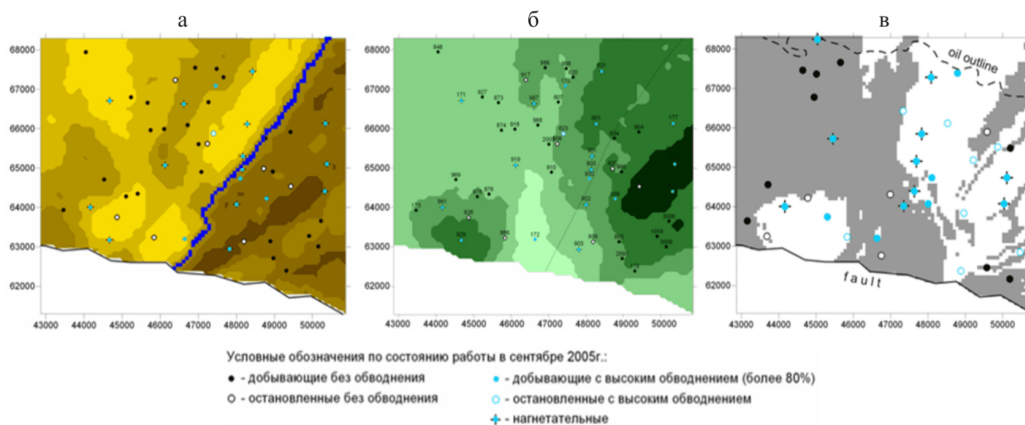


Рис. 5: Результат интерпретационной обработки данных МСЭ. Площадное распределение характеристик продуктивной толщи: а) литофациальный состав (глинизация); б) пластовое давление; в) обводненность

и динамических) характеристик МСЭ параметрам геологической среды.

С этой целью для продуктивной толщи были построены карты стационарных характеристик (при  $\tau = \text{const}$ ) случайного процесса изменения энергии МСЭ: среднего значения (рис. 4а), дисперсии (рис. 4б) и автокорреляции (рис. 4в) энергии волн МСЭ.

По этим данным выполнена интерпретационная обработка и получено площадное распределения таких геологических характеристик продуктивной толщи, как литологический состав или глинизация (рис. 5а),

пластовое давление (рис. 5б), обводненность (рис. 5в), структура флюидных потоков и др.

Одновременное кооперативное излучение упругой энергии множеством трещин, находящихся в пределах 1-ой зоны Френеля, создает волну сейсмического диапазона частот, которая относится к классу микросейсм ввиду ее малой энергии (на 2–3 порядка ниже зеркально отраженных волн, используемых в сейсмозаведке). Волны АЭ, САЭ и МСЭ имеют одну и ту же доминантную зависимость своих динамических и кинематических характеристик от вышеуказанных геологических



параметров. Это сходство, обусловленное фрактальными свойствами геологической среды, получено при сопоставлении результатов независимо выполненных лабораторных исследований АЭ на образцах с размерами  $\sim 10^{-2}$  м и экспериментальных полевых наблюдений МСЭ на площадях с размерами  $10^4$  м.

Комплекс полученной геологической информации позволяет сделать вывод о высокой геологической, экономической и экологической эффективности сейсмических исследований на основе изучения волн МСЭ при поиске, разведке и разработке месторождений УВ-сырья.

Кроме того, на основе многочисленных исследований МСЭ (по технологии СЛОЭ в режиме длительного мониторинга) и АЭ (в лабораторных условиях) были установлены два ранее не известных природных явления.

Во-первых, кинематические и динамические параметры МСЭ и АЭ соответствуют закону Гутенберга-Рихтера (о повторяемости землетрясений с разным энергетическим уровнем). Эта закономерность для энергии МСЭ, представленная в качестве примера (2013 г), для участка нефтяного месторождения в штате Техас, США (рис. 6), имеет прикладное значение и используется для анализа и обработки процессов МСЭ с целью отбраковки полевой информации, имеющей высокий уровень техногенных шумов.

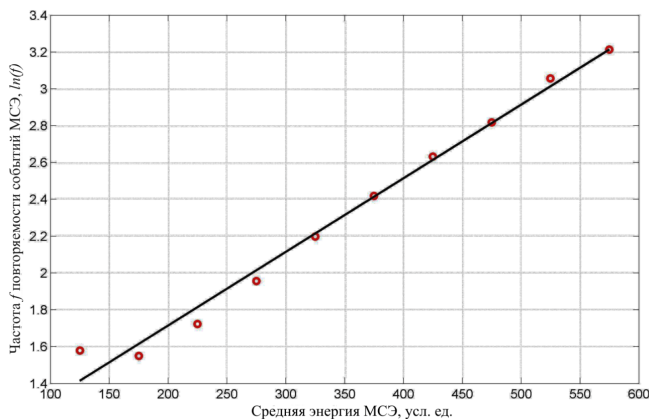


Рис. 6: Пример закона повторяемости Гутенберга-Рихтера для энергии МСЭ на участке нефтяного месторождения в Техас, США, 2013 г

Во-вторых, твердотельные лунно-солнечные приливы оказывают доминирующее влияние на средний уровень энергии МСЭ. На рис 7 представлено сопоставление изменения осредненной энергии МСЭ (а) и временного градиента силы тяжести (б), полученное для Росташинского месторождения Оренбургская области. Это явление проявляется в волнообразном изменении активности МСЭ (рис. 7а), в зависимости от положе-

ния Луны и Солнца относительно географических координат исследуемой площади, что физически выражается в изменении временного градиента силы тяжести (рис. 7б).

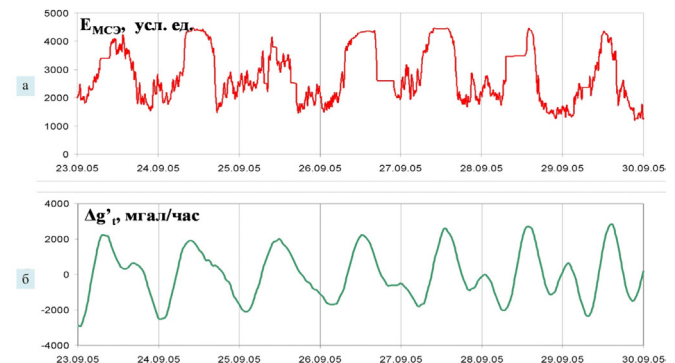


Рис. 7: Сопоставление графиков изменения осредненной энергии МСЭ (а) и временного градиента силы тяжести (б). Росташинское месторождение, Оренбургская обл

Данную зависимость используют в технологии СЛОЭ для оценки достоверности и качества выполненных полевых наблюдений

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Волны АЭ и МСЭ имеют высокую геологическую информативность об исследуемой среде. На основе проведенных экспериментальных лабораторных исследований особенностей АЭ на образцах и экспериментальных полевых наблюдений МСЭ, созданы новые методики и программы обработки временных рядов АЭ и МСЭ, по которым получены результаты, объясняющие наблюдаемые особенности излучения волн АЭ и МСЭ в нефтегазонасыщенных средах, их сходство и повторяемость в различных масштабах.

Результаты выполненных полевых сейсмических исследований позволили установить новые неизвестные ранее природные явления: во-первых, закономерности повторяемости АЭ и МСЭ в зависимости от уровня сигналов, что соответствует закону Гутенберга-Рихтера, и, во-вторых, доминантное влияние лунно-солнечных твердотельных приливов на активность сейсмоакустической эмиссии.

Необходимо расширить экспериментальные исследования сейсмоакустической эмиссии для создания высокоэффективных технологий поиска, разведки, разработки месторождений УВ-сырья и других полезных ископаемых, а также для контроля результатов различных техногенных воздействий в геологической среде и профилактики землетрясений.

- [1] Арутюнов С.Л., Давыдов В.Ф., Кузнецов О.Л., Графов Б.М., Сиротинский Ю.В. «Явление генерации инфразвуковых волн углеводородной залежью». Открытие № 109, РАЕН. (1977).
- [2] Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В. Доклады АН. **397**, № 1. С. 101.
- [3] Дыбленко В.П., Камалов Р.Н., Шарифуллин Р.Я., Туфанов И.А. Повышение продуктивности и реанимация скважин с применением виброволнового воздействия. (М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000).
- [4] Дыбленко В.П., Марчук Е.Ю., Туфанов И.А., Шарифуллин Р.Я., Евченко В.С. Волновые технологии и их использование при разработке месторождений нефти с трудноизвлекаемыми запасами. (М.: РАЕН, 2012).
- [5] Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Курьянов Ю.А., Рогоцкий Г.В., Дыбленко В.П. Сейсмоакустика пористых и трещиноватых сред. **3**. (М.: ВНИИГеосистем, 2007).
- [6] Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Курьянов Ю.А., Дыбленко В.П., Рогоцкий Г.В. Сейсмоакустика пористых и трещиноватых геологических сред. **2**. (М.: ВНИИГеосистем, 2004).
- [7] Кузнецов О.Л., Дыбленко В.П., Чиркин И.А., Шарифуллин Р.Я., Волков А.В. Геофизика. № 6. С. 8. (2007).
- [8] Николаев А.В. Проблемы наведенной сейсмичности. Наведённая сейсмичность. ОИФЗ РАН. (М.: Наука 1994).
- [9] Takayuki H. Geophys. J. Roy. Astron. Soc. **90**. (1987).

## Features of spectral characteristics of acoustic emission of petrosaturated rocks

O.L. Kuznetsov<sup>1,a</sup>, I.A. Chirkin<sup>1,b</sup>, V.P. Dyblenko<sup>2,c</sup>, R.Ya. Sharifullin<sup>2,d</sup>, E.G. Rizanov<sup>1,e</sup>

<sup>1</sup>International University for Nature, Society and Man "Dubna faculty of natural engineering sciences, department of the general and applied geophysics, Russia, 141980, Moscow region, Dubna, University, 19

<sup>2</sup>LLC «Oyl-Ingengering Scientific And Production Enterprise», Russia, 450096, Ufa, Shafiyeva, 44

E-mail: <sup>a</sup>olk@uni-dubna.ru, <sup>b</sup>iachirkin@gmail.com, <sup>c</sup>oilingin@ufanet.ru, <sup>d</sup>oilingin@ufanet.ru, <sup>e</sup>geo@uni-dubna.ru

Laboratory and field seismoacoustic researches on influence of external statistical and wave indignations on parameters of acoustic radiations from geological environments are conducted. During experiments continuous record and computer processing of the signals of acoustic and seismoacoustic emission (issue) in the mountain environment was carried out. These signals are informative parameters of an intense and deformation condition of the environment and its change, with development of new fields of a jointing and new filtrational fields. Essential influence of a saturating the pore fluid on character and extent of development at the microlevel of the processes of formation of cracks, and also a frequency range of acoustic and seismoacoustic emission in the mountain environment is established. The petrosaturated environment emits during loading less energy in the form of radiation — as if "accumulating" it. This process is followed by formation of abrupt spasmodic metastable states, thus in various temporary scales there are activity cycles at the beginning of which during the short periods of «calm» the system is in nodal points of «bifurcation». In them the further way of evolution of system — or decides on a tendency of increase of orderliness and accumulation of energy, or on increase of a randomness and allocation of internal energy. The received results can become a basis of creation of new highly effective innovative technologies of studying and investigation of a subsoil of Earth, and also seismoacoustic impact on productive layers for the purpose of increase of efficiency of wells and increase in oil recovery of layers.

PACS: 93.85.Bc

Keywords: acoustic emission, rock, crack, microseisms, fractality, wave, seismoacoustic influence.

Received 11.11.2014.

### Сведения об авторах

- Кузнецов Олег Леонидович — доктор техн. наук, профессор геологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова (кафедра геофизических исследований земной коры), Президент РАЕН, Президент Международного университета природы, общества и человека "Дубна"; тел.: (496) 216-61-61, e-mail: olk@uni-dubna.ru.
- Чиркин Игорь Алексеевич — канд. геол.-минер. наук, ведущий научный сотрудник ГНЦ ВНИИГеосистем, главный геофизик ИННТ РАЕН; тел.: (495) 389-48-84, e-mail: iachirkin@gmail.com.
- Дыбленко Валерий Петрович — канд. техн. наук, чл.-корр. РАЕН, научный руководитель разработок «НПП Ойл-инжиниринг»; тел.: (347) 237-28-56, e-mail: oilingin@ufanet.ru.
- Шарифуллин Ришад Яхиевич — канд. техн. наук, гл. специалист «НПП Ойл-Инжиниринг»; тел.: (347) 278-88-39, e-mail: oilingin@ufanet.ru.
- Ризанов Евгений Геннадиевич — аспирант кафедры общей и прикладной геофизики Международного университета «Дубна»; тел. (496) 216-61-16, e-mail: geo@uni-dubna.ru.