



## ОБ ОЦЕНКЕ ВЕЛИЧИНЫ СЕЙСМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ПЕРВОГО РОДА

А.К. Манштейн<sup>1</sup>, Г.В. Нестерова<sup>1</sup>, В.В. Филатов<sup>2</sup>, О.П. Саева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия, e-mail: MansteinAK@ipgg.sbras.ru

<sup>2</sup>Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья,  
630091, Новосибирск, Красный просп., 67, Россия, e-mail: filatov@sniiggims.ru

Анализ полевых электроразведочных данных и физического моделирования показывает существенное уменьшение удельного электрического сопротивления проводящих горизонтов, связанное с последствием сейсмических источников. В статье предложена математическая модель и выполнены расчеты возможного изменения удельного сопротивления горных пород в результате трансформации порового пространства. Кроме того, рассмотрена модель изменения удельного сопротивления в результате разрушения двойного электрического слоя в порах различного размера после сейсмического воздействия. Показано, что при этом могут наблюдаться как эффекты уменьшения удельного электрического сопротивления (УЭС), связанного с возникновением дополнительной электропроводности флюида за счет появления дополнительных подвижных ионов в поровом пространстве, так и эффекты вызванной поляризации.

*Сейсмoeлектрический эффект, удельная электропроводность, математическое моделирование*

### ASSESSING MAGNITUDE OF SEISMOELECTRIC EFFECT OF THE FIRST KIND

A.K. Manstein<sup>1</sup>, G.V. Nesterova<sup>1</sup>, V.V. Filatov<sup>2</sup>, O.P. Saeva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS,  
Acad. Koptuyuga prosp., 3, Novosibirsk, 630090, Russia, e-mail: MansteinAK@ipgg.sbras.ru

<sup>2</sup>Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources,  
Krasnyy prosp., 67, Novosibirsk, 630091, Russia, e-mail: filatov@sniiggims.ru

Analysis of the field data from electric prospecting and physical modeling shows an essential decrease in electrical resistivity of conductive formations, assisted by the activity of seismic sources. The paper presents a mathematical model and calculation results of possible changes of the rock electrical resistivity resulted from the changes in the pore space. It also describes modeled changes in the electrical resistivity caused by destruction of the double electric layer in pores of different sizes affected by a seismic impact. It has been shown that one can observe as reduction of the electrical resistance due to additional fluid conductivity caused by presence of complement mobile ions in the porous space, as the effects induced by polarization.

*Seismoelectric effect, electrical conductivity, mathematical modeling*

### ВВЕДЕНИЕ

Сейсмoeлектрические явления давно привлекают внимание геофизиков, и интерес этот базируется на изучении процессов, возникающих при одновременном возбуждении в среде упругих и электромагнитных полей. Сейсмoeлектроразведка наряду с немногими электроразведочными методами не относится к методу сопротивлений. В основе ее лежат совсем иные принципы, что позволяет существенно дополнить и уточнить результаты, получаемые как с помощью электроразведки, так и с помощью сейсморазведки.

Публикации по вопросам сейсмoeлектроразведки в основном касаются сейсмoeлектрического эффекта второго рода (сейсмoeлектрической конверсии), основы теории которого для горизонтально-однородной среды были развиты С. Прайдом, Я. Френкелем и Б.С. Световым. По Прайду [Pride, 1996], двойной электрический слой возникает на поверхности каждой частицы горной породы, где имеются водоразво-

димые вещества, т. е. существует ситуация, обычная для условий залегания осадочных горных пород. Механические (сейсмические) колебания способны деформировать двойной электрический слой и часть ионов внешней (диффузной) обкладки двойного электрического слоя [Шайдуров и др., 2012]. Часть ионов переходит в раствор или сильно отклоняется от своего первоначального положения. В результате смещения зарядов возникает переменное электромагнитное поле с частотой, совпадающей с частотой возбуждающего сейсмического поля. Б.С. Светов на основании многолетнего опыта полевых, скважинных и теоретических исследований пришел к выводу, что сейсмoeлектрика с использованием эффекта второго рода – метод инженерно-геологических и гидрогеологических исследований, т. е. малоглубинный [Светов, 2008].

Сейсмoeлектрический эффект первого рода (изменение под влиянием упругого воздействия электро-

физических свойств среды, в частности удельного электрического сопротивления) обладает существенно большей глубиной проникновения в геологическую среду, которая не всегда ограничивается мощностью примененного источника [Озерков, 1992]. Кроме того, характерной чертой эффекта первого рода является длительное время релаксации (достигающее порой нескольких суток), а иногда и необратимый процесс преобразования среды. Замечено, что столь сильный и длительный процесс характерен для трещиноватых, относительно малопористых коллекторов преимущественно карбонатного состава.

Существуют теоретические описания некоторых особенностей эффекта первого рода. Большая глубинность объясняется эстафетным процессом образования трещин в жестких кристаллических породах [Добрынин, 1970] и так называемым “триггерным эффектом”, т. е. способностью горной породы, находящейся в состоянии энергетической неустойчивости, самовозбуждаться и менять свои параметры под действием сравнительно слабого сигнала [Майбук, 2006]. Процесс трещинообразования не заканчивается с окончанием воздействия, а распространяется во времени и пространстве, очень медленно затухая. Подобный процесс может приводить к существенным изменениям физических параметров геологической среды. Например, величина удельного электрического сопротивления среды после вибрации может отличаться в несколько раз от начальной [Кузнецов и др., 2007, 2008].

В работе [Дьяконов, Файзуллин, 2009] рассмотрен возможный механизм реагирования на сейсмоакустическое влияние. Эффективность управляемых воздействий повышается автоэмиссионным механизмом возбуждения и эстафетой передачи упругих импульсов от распространяющихся колебаний. Кроме того, в трещиноватых породах происходит квазистатическое локальное наполнение и изменение напряжений, и возникает дополнительное излучение упругих колебаний, которые “достигают, а иногда и превосходят уровни первичных техногенных и естественных нагрузок” [Дьяконов Файзуллин, 2009]. Трещины не только вносят искажение внешнего поля напряжений, но в определенных условиях являются источниками акустических и электромагнитных волн. Одним из механизмов генерации этих волн является распространение разрыва со скоростями, близкими к

скорости поперечных волн. Отклик среды не прямо пропорционален числу импульсов воздействия. Подрастание, взаимодействие и автоэмиссия являются ведущими механизмами развития трещиноватости и группирования в виде кластеров (или линейных систем различного масштаба) в поле переменных нагрузок. Указанные механизмы являются основой “самоорганизации” трещиноватости в условиях сложного напряженно-деформированного состояния геологической среды.

Одна из главных особенностей проявления сейсмoeлектрического эффекта – нелинейность и непредсказуемость его проявления по отношению к возбуждающему импульсу. Все больше и больше начинает преобладать точка зрения, что сейсмoeлектрическая конверсия возникает не только за счет прямой передачи энергии, возбуждаемой искусственно (вибратор, взрыв), но и из-за внутренней энергии горной породы, и сейсмическая энергия играет лишь роль “спускового крючка”. Б.С. Светов [2008] считает так: “Сейсмoeлектрика рассматривается как геофизический метод, позволяющий выйти на новый уровень познания реальной геологической среды – получения информации об ее энергетическом состоянии и о строении горных пород. При воздействии на геологическую среду упругим полем в областях ее энергетической неустойчивости происходят необратимые изменения физических параметров, в частности удельного электрического сопротивления”.

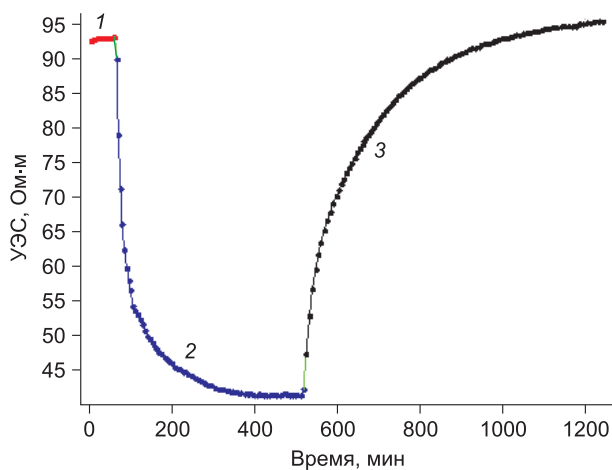
Проявление сейсмoeлектрических эффектов зависит от большого количества разнообразных геологических, физических и химических параметров, зачастую неизвестных и не измеряемых экспериментально. Поэтому создание общей математической модели для решения прямых и обратных задач, связанных непосредственно с расчетом сейсмoeлектрического эффекта для конкретной среды, – дело будущего.

Актуальным является решение некоторых конкретных задач расчета изменений удельной электропроводности коллектора после механического воздействия, связанных с интерпретацией экспериментальных данных. Лабораторные исследования образцов показывают, что после механического воздействия УЭС породы может уменьшаться более чем в два раза (рис. 1).

#### МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Рассмотрим, можно ли объяснить такой эффект изменением геометрии порового пространства при упругом воздействии. Примем схему формирования величины удельной электропроводности горной породы, основанную на фрактальной модели среды [Nigmatullin et al., 1992]. Фрактальность в реальной горной породе можно определить как самоподобие в определенном диапазоне масштабов.

Рассмотрим ячейку размера  $\Lambda$ , где  $\Lambda$  определяет максимальный масштаб самоподобия в поровом пространстве. Величины пористости и проводимости среды могут быть определены ко всей системе в целом. При наличии разности потенциалов на противоположных сторонах ячейки жидкость, насыщающая поровую систему и обладающая проводимостью, позволяет создать ряд токопроводящих путей между этими сторонами. Суммируя токи по всем проявившимся путям и усредняя величину токов по всем размерам пор, получаем средний ток, протекающий по ячейке, и, соответственно, удельную электропроводность.



**Рис. 1.** Изменение УЭС образца горной породы до (1), во время (2) и после (3) упругого воздействия.

В данной модели, мы предполагаем, что каждый токопроводящий путь, возникший в поре размером  $\Lambda\lambda$  ( $\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$ ), имеет сечение  $G_S(\Lambda\lambda)^2$  и обладает фрактальной извилистостью, т. е. длиной пути  $L_p(\lambda)$ , которая задается выражением

$$L_p(\lambda) = G_I \Lambda \lambda^{1-D_I} \quad (1)$$

и превышает расстояние  $\Lambda$  между противоположными сторонами ячейки ( $D_I > 1$ ). Здесь  $G_I$  – геометрический фактор и  $D_I$  – фрактальная размерность пути. Формальное определение извилистости  $T(\lambda)$ :

$$T(\lambda) = [L_p(\lambda)/\Lambda] = G_I \lambda^{1-D_I}. \quad (2)$$

Таким образом, проводимость пути задается величиной

$$\sigma_p = [G_S (\Lambda\lambda)^2 / L_p(\lambda)] \sigma_0, \quad (3)$$

и протекающий ток есть

$$I_p = [G (\Lambda\lambda)^2 \sigma_0 U / L_p(\lambda)], \quad (4)$$

где  $U$  – разность потенциалов между противоположными сторонами образца. Надо отметить, что приведенное выше определение проводящего пути не игнорирует связи в поровом пространстве, а учитывает их в значении  $D$ , превышающем единицу. Так, если альтернативный путь проходит через то же поровое горло, то токи потекут по пути, имеющему меньшую извилистость, и действующее поперечное сечение пути будет равняться наименьшему сечению по маршруту.

В силу фрактальности структуры порового пространства можно взять число проводящих путей с размером пор  $\Lambda\lambda$  (которые пересекают ячейку), равным  $(\lambda)^{-D_s}$ , где  $D_s$  есть фрактальная размерность сечения системы проводящих пор в плоскости, нормальной к оси электрического поля. Ток, протекающий по любому из проводящих путей с размером  $\lambda$ , равен, таким образом:

$$I(\lambda) = G_S \Lambda^2 (\lambda)^{2-D_s} [\sigma_0 U / L_p(\lambda)]. \quad (5)$$

Общий ток получается суммированием в диапазоне масштабов ( $\lambda_1, \lambda_2$ ):

$$I = \sigma_0 U \frac{G_S}{G_I} \Lambda \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda^{1-D_s+D_I}. \quad (6)$$

Удельная проводимость в этом случае равна:

$$\sigma = I/\Lambda U = \sigma_0 U \frac{G_S}{G_I} \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda^{1-D_s+D_I}. \quad (7)$$

В случае, когда поровая структура может быть описана одним фракталом и масштаб суммирования в выражении совпадает с масштабом самоподобия, из этой формулы могут быть получены известные выражения для проводимости в виде закона Арчи. Если, кроме того, предполагать, что объем порового пространства ячейки совпадает с объемом токопроводящих путей, то показатель  $m$  в формуле Арчи может быть записан в виде:

$$m = 1 + 2 \frac{D_I - 1}{3 - D_V}. \quad (8)$$

Здесь  $D_V$  – статистическая фрактальная размерность порового объема,  $D_I$  – статистическая характеристика извилистости.

Рассмотрим более сложную модель, включающую дополнительную “пристеночную” область порового канала, свойства которой могут изменяться и менять размер и конфигурацию поровых каналов и, соответственно, удельную проводимость среды [Титов, 2003]. С точки зрения сейсмoeлектрического эффекта нас будет интересовать модель, в которой такая дополнительная область может как уменьшать, так и увеличивать площадь сечения поровых каналов.

Пусть масштаб самоподобия меняется по закону  $\lambda = \lambda_0^{k/K}$  ( $\lambda_0$  – минимальный масштаб диапазона;  $k, K$  – целые числа). Несложно показать, что суммарная площадь сечений открытой части поровых каналов в диапазоне масштабов ( $0 \leq k \leq K$ ) равняется:

$$S_V = G_S \Lambda_0^2 \sum_{k=0}^K (\lambda_0^{(2-D_s)/K})^k, \quad (9)$$

где  $\Lambda_0$  – максимальный размер сечения порового канала в рассматриваемом диапазоне масштабов.

Суммарная площадь сечений пристеночной (шириной  $d$ ) части поровых каналов может быть представлена в виде:

$$S_d = G_I \Lambda_0 d \sum_{k=0}^K (\lambda_0^{(1-D_s)/K})^k. \quad (10)$$

После упрощений формулы записываются следующим образом:

$$S_V = \frac{G_S \Lambda_0^2 K}{(2 - D_s) \ln \lambda_0} (\lambda_0^{(2-D_s)} - 1), \quad (11)$$

$$S_d = \frac{G_I \Lambda_0 d K}{(2 - D_s/2) \ln \lambda_0} (\lambda_0^{(1-D_s/2)} - 1). \quad (12)$$

Отношение этих величин, соответственно, будет иметь вид:

$$\frac{S_d}{S_V} = \frac{2G_I}{G_S} \frac{d}{\Lambda_0 (\lambda_0^{(1-D_s/2)} + 1)}. \quad (13)$$

Учитывая, что при неизменной извилистости удельная проводимость определяется площадью сечения, это соотношение дает возможность оценки влияния смещения стенок поры, обусловленного упругим воздействием. Отметим, что смещение может происходить в разных направлениях.

Кроме того, эта модель позволяет рассматривать случай, когда пристеночная область обладает собственной электропроводностью. Как правило, мы имеем дело с двумя состояниями флюида: свободным и связанным. Свойства флюида в пристеночной области поры (например, проводимость  $\sigma_{0d}$ ) могут существенно отличаться от его проводимости в свободном состоянии  $\sigma_0$ . Для такой модели можно получить некоторое обобщенное выражение закона Арчи [Филатов, Полетаева, 1998]:

$$\sigma = a_m \left[ \left( 1 - \frac{2G_I}{G_S} \frac{d}{\Lambda_0} \right) \sigma_0 + \frac{2G_I}{G_S} \frac{d}{\Lambda_0} \sigma_{0d} \right] \Phi^m, \quad (14)$$

где  $m$  выражается формулой (8).

На площади пристеночной области формируются заряды, определяющие двойной электрический слой в порах, играющий большую роль в проявлении сейсмoeлектрического эффекта второго рода. В случае, когда поры имеют правильную форму, можно выполнить прямой подсчет эффекта, связанного с измене-

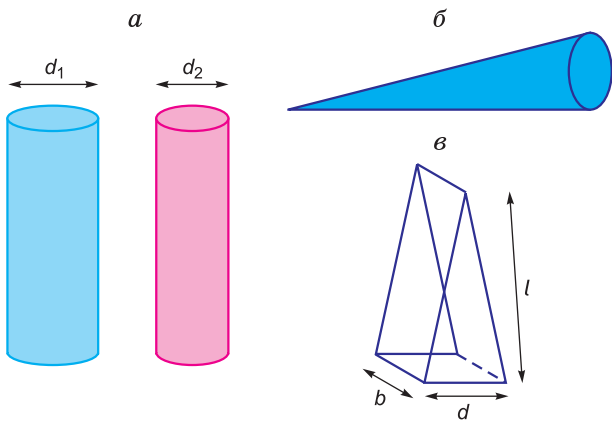


Рис. 2. Трещины: а – цилиндрические; б – конические; в – призматические.

нием геометрии пор и диффузией двойного электрического слоя.

Рассмотрим случай, когда на поверхности среды расположен сейсмический заглублённый источник с массой взрывчатого вещества 1 кг. Зная скорость смещения сейсмического колебания на заданном расстоянии от пункта взрыва и частоту сейсмического сигнала, можно оценить смещение породы [Шевченко, 2002]. Для сейсморазведочного зондирования на глубины до 1000 м можно принять частоту сейсмических колебаний 10 Гц. Для скорости смещения сейсмического колебания  $0.7 \cdot 10^{-4}$  м/с смещение породы будет на уровне  $7 \cdot 10^{-6}$  м. Так как упругая деформация меньше смещения, рассмотрим изменение раскрытости трещин на величину от  $0.5 \cdot 10^{-6}$  до  $7 \cdot 10^{-6}$  м. Примем исходную (до воздействия) раскрытость трещин, в расчетах равной  $2 \cdot 10^{-5}$  м. Исследуем возможные причины изменения УЭС при механическом воздействии. Рассмотрим породу, состоящую из непроводящего скелета и включений в виде  $N$  трещин одинакового размера в форме цилиндров, конусов и треугольных призм, т. е. будем рассматривать ячейку породы, поровые каналы в которой имеют правильную геометрию, но обладают прежней извилистостью.

Рассчитаем, насколько изменится УЭС породы при указанном смещении, для случая уменьшения раскрытости пор:

а) цилиндрические (рис. 2, а) и конические (см. рис. 2, б) трещины: диаметр основания –  $d_1$ , после схлопывания трещины он равен  $d_2$ . Тогда объем трещины до деформации  $V_1 = Gd_1^2 L$ , где  $L$  – высота конуса или цилиндра,  $G$  – геометрический фактор, зависящий от формы фигуры:  $G = \pi/4$  для цилиндра и  $G = \pi/12$  для конуса. После деформации объем трещины составит  $V_2 = Gd_2^2 L$ . Тогда общий объем пространства, занятого поровым флюидом, будет равен  $\phi_1 = GNLd_1^2$ , после деформации  $\phi_1 = GNLd_2^2$ .

Предположим, что в трещине после воздействия сохраняется флюид с тем же самым УЭС  $\rho_w$ , тогда, используя формулу Арчи в виде  $\rho = A\rho_w\phi^{-n}$ , где  $\rho$  – УЭС породы,  $\phi$  – пористость, получаем:

$$\rho_1 = A\rho_w\phi_1^{-n}; \quad \rho_2 = A\rho_w\phi_2^{-n}.$$

Тогда

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{A\rho_w\phi_2^{-n}}{A\rho_w\phi_1^{-n}} = \left(\frac{\phi_1}{\phi_2}\right)^n, \text{ или } \rho_2 = \rho_1 \left(\frac{\phi_1}{\phi_2}\right)^n = \rho_1 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{2n}. \quad (15)$$

Здесь  $n$  принимает значения от 1.8 до 2.2, в зависимости от извилистости поровых каналов породы. Для  $n = 2$  в табл. 1 приведены коэффициенты увеличения УЭС породы при изменении раскрытости трещин (четвертый столбец). Например, если исходное раскрытие трещины составляло  $2 \cdot 10^{-5}$  м, а после механического воздействия составило  $1.3 \cdot 10^{-5}$  м, то  $\rho_2 = 5.6 \cdot \rho_1$ , т. е. УЭС породы возрастет в 5.6 раза;

б) призматические трещины (см. рис. 2, в). Трещина имеет вид треугольной призмы с высотой  $b$ , стороной и высотой основания  $d_1$  и  $l$  соответственно, после закрытия –  $d_2$  и  $l$ . Тогда

$$V_1 = \frac{1}{2}d_1\sqrt{l^2 - \frac{1}{4}d_1^2}b \approx \frac{1}{2}d_1\left(l - \frac{d_1}{4l}\right)b, \quad (16)$$

$$V_2 = \frac{1}{2}d_2\sqrt{l^2 - \frac{1}{4}d_2^2}b \approx \frac{1}{2}d_2\left(l - \frac{d_2}{4l}\right)b. \quad (17)$$

Таблица 1

Увеличение УЭС для разных значений раскрытости трещины после деформации

Исходная раскрытость трещины, м	Изменение размера трещины, м	Раскрытие трещины после деформации, м	Коэф. увеличения УЭС для цилиндрических и конических трещин	Коэф. увеличения УЭС для призматических трещин
$2 \cdot 10^{-5}$	$0.5 \cdot 10^{-6}$	$1.95 \cdot 10^{-5}$	1.11	1.05
$2 \cdot 10^{-5}$	$1.0 \cdot 10^{-6}$	$1.90 \cdot 10^{-5}$	1.23	1.11
$2 \cdot 10^{-5}$	$1.5 \cdot 10^{-6}$	$1.85 \cdot 10^{-5}$	1.37	1.17
$2 \cdot 10^{-5}$	$2.0 \cdot 10^{-6}$	$1.80 \cdot 10^{-5}$	1.52	1.23
$2 \cdot 10^{-5}$	$2.5 \cdot 10^{-6}$	$1.75 \cdot 10^{-5}$	1.71	1.31
$2 \cdot 10^{-5}$	$3.0 \cdot 10^{-6}$	$1.70 \cdot 10^{-5}$	1.92	1.38
$2 \cdot 10^{-5}$	$3.5 \cdot 10^{-6}$	$1.65 \cdot 10^{-5}$	2.16	1.47
$2 \cdot 10^{-5}$	$4.0 \cdot 10^{-6}$	$1.60 \cdot 10^{-5}$	2.44	1.56
$2 \cdot 10^{-5}$	$4.5 \cdot 10^{-6}$	$1.55 \cdot 10^{-5}$	2.77	1.66
$2 \cdot 10^{-5}$	$5.0 \cdot 10^{-6}$	$1.50 \cdot 10^{-5}$	3.16	1.78
$2 \cdot 10^{-5}$	$5.5 \cdot 10^{-6}$	$1.45 \cdot 10^{-5}$	3.62	1.9
$2 \cdot 10^{-5}$	$6.0 \cdot 10^{-6}$	$1.40 \cdot 10^{-5}$	4.16	2.04
$2 \cdot 10^{-5}$	$6.5 \cdot 10^{-6}$	$1.35 \cdot 10^{-5}$	4.82	2.19
$2 \cdot 10^{-5}$	$7.0 \cdot 10^{-6}$	$1.30 \cdot 10^{-5}$	5.6	2.36



Объем пространства, занятого флюидом до сейсмического воздействия,  $\phi_1 = NV_1$ , после  $\phi_2 = NV_2$ . При условии сохранения неизменной величины УЭС насыщающего флюида и для значений  $d$ , малых по сравнению с  $l$ ,

$$\rho_2 = \rho_1 \left( \frac{\phi_1}{\phi_2} \right)^n \approx \rho_1 \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^n \cdot \rho_2 = \rho_1 \left( \frac{\phi_1}{\phi_2} \right)^n \approx \rho_1 \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^n \quad (18)$$

В табл. 1 (пятый столбец) приведены коэффициенты увеличения УЭС породы с трещинами призматического вида. Например, если исходное раскрытие трещины составляло  $2 \cdot 10^{-5}$  м, а после механического воздействия составило  $1.3 \cdot 10^{-5}$  м, то при  $n = 2$   $\rho_2 = 2.36 \cdot \rho_1$ , т. е. УЭС породы возрастет в 2.36 раза.

Как показывают расчеты, импульсное сжатие не приводит к уменьшению УЭС коллектора.

Прямо противоположный результат наблюдается при увеличении размеров трещин (или образовании новых трещин), приводящих к увеличению пористости или образованию новых токопроводящих путей. Очевидно, что схлопывание или расширение трещин зависит от их ориентации относительно источника упругого воздействия. Продольные сейсмические волны, распространяющиеся в геологической среде, вызывают как сжатие, так и растяжение среды, через которую они проходят.

В связи с этим нами исследовано изменение УЭС коллектора в случае увеличения размера трещин после механического воздействия. Результаты расчетов для рассматриваемого случая по формулам (15), (18) приведены на рис. 3. На графике по оси абсцисс отложен диаметр трещины после механического воздействия при исходном диаметре  $2.0 \cdot 10^{-5}$  м. По ординате отложен коэффициент уменьшения УЭС породы коллектора после раскрытия трещины цилиндрической или конической формы и трещины призматической формы (для различных  $n$ ). Получается, что в случае конической трещины для уменьшения УЭС в 1.5 раза достаточно увеличения диаметра трещины на 10–12%. То же самое при  $n = 1.8, 2, 2.2$ .

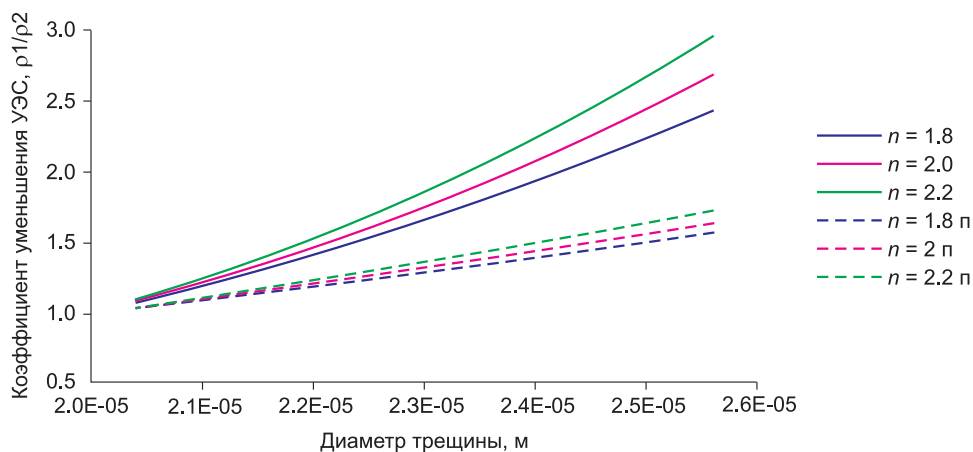
Таким образом, после механического воздействия для сред с различной конфигурацией пор УЭС породы изменяется по-разному. Окончательный эффект зависит от количества и ориентации трещин.

Полевые экспериментальные данные при зондировании становлением электромагнитного поля (метод ЗС) показывают, что при одиночных взрывах небольшой мощности могут не отмечаться заметные изменения сопротивления разреза, но наблюдаются явные (до 20%) отклонения процессов становления на поздних временах, обусловленных влиянием процессов вызванной поляризации. В связи с этим следует отметить, что существует еще один путь проявления сейсмoeлектрического эффекта, основанный на теории Прайда, связанной с деформацией диффузной части ионов двойного электрического слоя при упругом воздействии. Мы будем оценивать не непосредственный эффект от токов, обусловленных смещением ионов, а будем учитывать влияние этих ионов на величину удельного электрического сопротивления пород коллектора, которое после упругого воздействия можно измерить электроразведочными средствами.

В рамках сейсмoeлектрической модели найдем условия уменьшения удельного электрического сопротивления пористого пласта после механического воздействия, связанные с увеличением числа проводящих ионов в поровой жидкости, в зависимости от размеров и формы пор.

Геометрия пор чрезвычайно сложна, но можно выделить три общих типа: поры закрытые, или не сообщающиеся, которые не могут каким-либо образом способствовать перемещению вещества; слепые поры, которые в малой степени влияют на перемещение вещества; поры открытые и сообщающиеся, которые обеспечивают перемещение газа и жидкости внутри породы. Из-за этих различий, когда проводится измерение средней пористости гелиевым пикнометром или ртутным измерителем пористости, только два последних типа пористости можно принять во внимание, и для них дается определение эффективной пористости.

Известны возможные механоэлектрические эффекты уменьшения удельного сопротивления пласта [Потапов и др., 1995], основанные на сейсмoeлектрических явлениях. Из литературных данных [Духин, Дерягин, 1975] известны также величины электрокинетического потенциала песчано-глинистых смесей, которые находятся в интервале 10–80 мВ. По другим данным, электрокинетический потенциал для пород



**Рис. 3.** Коэффициент уменьшения УЭС после воздействия для трещин цилиндрической и конической форм (сплошные линии) и трещин призматической формы (пунктирные линии). Случай увеличения размера трещин после механического воздействия. Легенда – значение индекса цементации породы (степень при пористости в формуле Арчи).

коллектора может достигать 1 В [Горшков и др., 2001; Шайдуров и др., 2012]. Будем считать исходное состояние пор электронейтральным. Допустим, что электролит состоит из растворенной в воде соли NaCl. Из-за различия в диэлектрической проницаемости флюида и скелета породы образованные ионы будут составлять диффузную часть двойного электрического слоя в порах. Так как двойной электрический слой для быстропротекающих механических воздействий представляет систему покоящихся точечных зарядов, находящихся на конечном расстоянии друг от друга, то система не может быть устойчива согласно теореме Ирншоу [Тамм, 1957; Earnshaw, 1842]: внутренняя энергия системы не находится в минимуме потенциальной энергии. Тогда быстрое механическое воздействие от удаленного взрыва может вызвать триггерный эффект разрушения электронейтральной системы, что впервые обнаружил в 1939 г. А.Г. Иванов [1940] и назвал эффектом электризации пластовых залежей при прохождении через них упругих волн. Уточним, что электропроводность флюида мы рассматриваем без влияния сторонних электрических сил и электрический потенциал внутри поры равен отношению потенциальной энергии комплекса зарядов к величине самого заряда.

Выполним математическое моделирование уменьшения УЭС породы пласта-коллектора после механического воздействия в рамках разработанной сейсмоэлектрической модели. Переменными величинами являются: конфигурация пор в виде кубиков, сфер и трещин призматической формы; размеры пор в диапазоне от  $0.4 \cdot 10^{-6}$  до  $0.26 \cdot 10^{-5}$  м.

Число пор  $N_p$  в  $1 \text{ м}^3$  породы при пористости  $\phi$  есть  $N_p = \phi/V_p$ , где  $V_p$  ( $\text{м}^3$ ) – объем одной поры; общая площадь поверхности всех пор, составляющих поровый объем,  $S = S_p N_p = \phi \frac{S_p}{V_p}$  ( $\text{м}^2$ ), где  $S_p$  – площадь поверхности одной поры, поверхности, на которой размещается двойной электрический слой.

Таблица 2

Число пор и величина площади внутренней поверхности для разных длин трещины  $l$

$l, 10^{-06} \text{ м}$	$S_p, 10^{-12} \text{ м}^2$	$N_p, 10^{18} \text{ штук}$	$S, 10^7 \text{ м}^2$
0.40	0.61	5.41	0.334
0.60	0.86	3.31	0.287
0.80	1.11	2.42	0.268
1.0	1.35	1.91	0.258
1.2	1.59	1.58	0.252
1.4	1.83	1.35	0.248
1.6	2.07	1.18	0.245
1.8	2.31	1.05	0.242
2.0	2.55	0.94	0.240
2.2	2.79	0.85	0.239
2.4	3.03	0.78	0.238
2.6	3.27	0.72	0.237
2.8	3.51	0.67	0.236
3.0	3.75	0.62	0.235
3.2	3.99	0.58	0.234
3.4	4.23	0.55	0.234
3.6	4.47	0.52	0.233
3.8	4.71	0.49	0.233

Для поры в виде куба со стороной  $d$  объем поры равен  $V_p = d^3$ , площадь поверхности  $S_p = 6d^2$ ,  $\frac{S_p}{V_p} = \frac{6}{d}$ .

Для поры в виде сферы с диаметром  $d$  объем поры равен  $V_p = \frac{\pi}{6} d^3$ , площадь поверхности  $S_p = \pi d^2$ ,  $\frac{S_p}{V_p} = \frac{6}{d}$ .

Для поры в виде треугольной призмы со сторонами треугольника  $l$  и  $d$ , высотой  $b$  площадь внутренней поверхности одной поры равна

$$S_p = 2 \frac{1}{2} d \sqrt{l^2 - d^2/4} + 2bl + db. \text{ Объем одной поры } V_p = \frac{1}{2} d \sqrt{l^2 - d^2/4} b.$$

Число пор и величина площади внутренней поверхности для разных длин трещины  $l$  при характерной величине раскрытия  $d = b = 4 \cdot 10^{-7}$  приведены в табл. 2. Распределение пор по размерам взято из работы [Fallini, 1991].

Рассчитаем удельную электрическую проводимость (УЭП) флюида, находящегося в порах породы с УЭС, равным 30 Ом-м, и имеющего пористость 15 %. Из формулы Арчи  $\sigma = \sigma_w \cdot \phi^2$ , где  $\sigma$  – УЭП породы,  $\sigma_w$  – УЭП флюида,  $\phi$  – пористость, получим удельную электропроводность флюида  $\sigma_w = 1.48 \text{ См/м}$  (или УЭС = 0.675 Ом-м). Это соответствует при 30 °С концентрации 8 г/л, или  $8/58.448 = 0.136$  моль/л, где 58.448 – молярная масса NaCl [Добош, 1980].

Определим число ионов в двойном электрическом слое порового пространства  $1 \text{ м}^3$  породы, которые перейдут во флюид после механического воздействия. Для этого воспользуемся формулой для поверхностной плотности заряда, приведенной в работе [Делахей, 1967] (в главе III – строение диффузного двойного слоя). Поверхностная плотность зарядов  $q$  (в мкКл/см<sup>2</sup>) для водных растворов  $z$ ,  $z$  зарядного электролита при 25 °С рассчитывается по формуле:

$$q = 11.74 \sqrt{C} sh(19.46 |z| \phi), \quad (19)$$

где  $C$  – концентрация раствора в моль/л,  $\phi$  – потенциал Штерна в вольтах (примем 50 мВ).

$$\text{Запишем } q = 11.74 \sqrt{0.136} sh(0.974) = 5 \text{ мкКл/см}^2.$$

Учитывая, что  $\text{мкКл/см}^2 = 10^{-6} \text{ Кл/}10^{-4} \text{ м}^2 = 10^{-2} \text{ Кл/м}^2$ , общий поверхностный заряд в  $1 \text{ м}^3$  породы  $Q = Sq \cdot 10^{-2} \text{ Кл}$ .

Число ионов, соответствующих этому заряду, находим из равенства  $N = Q/e$ , где  $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  – элементарный заряд.

Количество вещества NaCl в молях ( $M$ ) определяется отношением  $M = N/N_A$ ,  $A = N/6.02 \cdot 10^{23}$ . Это в свою очередь соответствует  $(58.448 \cdot M)$  в граммах вещества, а с учетом 15%-й пористости породы дополнительная концентрация соли в поровом флюиде составит  $58.448 \cdot M/150 \text{ г/л}$ .

В табл. 3 для разных длин трещин приведены: величина заряда в двойном электрическом слое; количество ионов одного знака в  $1 \text{ м}^3$  данной породы, когда в порах имеется двойной электрический слой с электрокинетическим потенциалом 50 мВ; дополнительная концентрация и дополнительная электропроводность порового флюида.

Таблица 3

**Дополнительная концентрация и электропроводность  
после разрушения двойного электрического слоя  
в зависимости от длины трещин**

$l$ , м	$Q$ , Кл	$N$ , шт	Доп. концент- рация NaCl, г/л	Доп. УЭП, См/м
0.40·10 <sup>-6</sup>	0.1644·10 <sup>6</sup>	0.1027·10 <sup>24</sup>	0.6671	0.111
0.60·10 <sup>-6</sup>	0.1410·10 <sup>6</sup>	0.8810·10 <sup>24</sup>	0.5721	0.0953
0.80·10 <sup>-6</sup>	0.1319·10 <sup>6</sup>	0.8243·10 <sup>24</sup>	0.5353	0.0892
0.10·10 <sup>-5</sup>	0.1270·10 <sup>6</sup>	0.7938·10 <sup>24</sup>	0.5155	0.0859
0.12·10 <sup>-5</sup>	0.1240·10 <sup>6</sup>	0.7747·10 <sup>24</sup>	0.5031	0.0838
0.14·10 <sup>-5</sup>	0.1219·10 <sup>6</sup>	0.7616·10 <sup>24</sup>	0.4945	0.0824
0.16·10 <sup>-5</sup>	0.1203·10 <sup>6</sup>	0.7520·10 <sup>24</sup>	0.4883	0.0814
0.18·10 <sup>-5</sup>	0.1192·10 <sup>6</sup>	0.7447·10 <sup>24</sup>	0.4836	0.0806
0.20·10 <sup>-5</sup>	0.1182·10 <sup>6</sup>	0.7390·10 <sup>24</sup>	0.4798	0.0800
0.22·10 <sup>-5</sup>	0.1175·10 <sup>6</sup>	0.7343·10 <sup>24</sup>	0.4768	0.0795
0.24·10 <sup>-5</sup>	0.1169·10 <sup>6</sup>	0.7305·10 <sup>24</sup>	0.4743	0.0791
0.26·10 <sup>-5</sup>	0.1164·10 <sup>6</sup>	0.7273·10 <sup>24</sup>	0.4722	0.0787
0.28·10 <sup>-5</sup>	0.1159·10 <sup>6</sup>	0.7245·10 <sup>24</sup>	0.4705	0.0784
0.30·10 <sup>-5</sup>	0.1155·10 <sup>6</sup>	0.7222·10 <sup>24</sup>	0.4689	0.0782
0.32·10 <sup>-5</sup>	0.1152·10 <sup>6</sup>	0.7201·10 <sup>24</sup>	0.4676	0.0779
0.34·10 <sup>-5</sup>	0.1149·10 <sup>6</sup>	0.7183·10 <sup>24</sup>	0.4664	0.0777
0.36·10 <sup>-5</sup>	0.1147·10 <sup>6</sup>	0.7167·10 <sup>24</sup>	0.4654	0.0776
0.38·10 <sup>-5</sup>	0.1144·10 <sup>6</sup>	0.7153·10 <sup>24</sup>	0.4645	0.0774

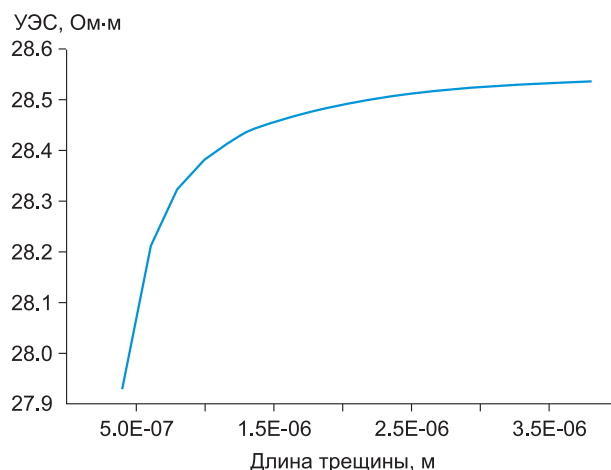
Удельная электропроводность порового флюида после механического воздействия стала равной сумме УЭП до воздействия и дополнительной электропроводности, возникшей за счет появления в поровом флюиде дополнительного числа ионов. Переведем электропроводность флюида в УЭП пласта по формуле Арчи. График зависимости УЭС (после механического воздействия) от длины трещины при выбранном характерном значении ее раскрытия приведен на рис. 4.

Уменьшение УЭС в рамках выбранной модели зависит от формы пор и их характерного размера. Чем больше мелких пор в поровом пространстве, тем больше удельная поверхность и тем большие последствия может иметь механическое воздействие. Для оценки возможного эффекта желательно иметь информацию прежде всего о величине удельной поверхности пор.

Образование дополнительного числа носителей заряда в открытых порах может проявляться еще одним эффектом – усилением процессов вызванной поляризации. Кроме того, эти процессы могут возникнуть и в зонах коллектора, занятых закрытыми порами, т.е. в виде процессов вызванной поляризации, не наблюдаемых до механического воздействия. Время существования вызванной поляризации будет связано с наличием релаксации электрических зарядов ионов жидкой фазы среды. По-видимому, эти процессы и были отмечены в упомянутых выше полевых экспериментах.

### ВЫВОДЫ

Изменение сопротивления пород коллектора, наблюдаемое после упругого воздействия, может быть обусловлено как изменением геометрии порового



**Рис. 4.** Зависимость УЭС после механического воздействия от исходной длины трещины для породы с начальным УЭС, равным 30 Ом·м.

пространства, так и появлением дополнительных подвижных ионов в поровом пространстве, образующихся за счет деформации диффузной части двойного электрического слоя. Чем больше мелких пор (трещин) в поровом пространстве, тем большие последствия может иметь механическое воздействие. Кроме того, влияние упругого воздействия может проявляться в усилении или возникновении дополнительных (не наблюдаемых ранее) процессов вызванной поляризации в методе ЗС.

### Литература

- Горшков М.М., Заикин В.Т., Лобачев С.В.** Об электропроводности горных пород при ударном сжатии // Прикладная механика и техническая физика. 2001. Т. 42, № 2. С. 16–22.
- Делахей П.** Двойной слой и кинетика электродных процессов. М.: Мир, 1967. 252 с.
- Добаш Д.** Электрохимические константы (справочник для электрохимиков). М.: Мир, 1980. 368 с.
- Добрынин В.М.** Деформации и изменения физических свойств коллекторов нефти и газа. М.: Недра, 1970. 239 с.
- Духин С.С., Дерягин Б.М.** Электрофорез. М.: Наука, 1975. 332 с.
- Дьяконов Б.П., Файзуллин И.С.** Реакция трещиноватоблочных сред на сейсмоакустические воздействия и естественные колебания // Геофизика. 2009. № 3. С. 5–11.
- Иванов А.Г.** Сейсмoeлектрический эффект второго рода // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. и геогр. 1940. № 5. С. 699–727.
- Кузнецов А.Н., Ключкин В.Н., Харин Е.П., Хонькина В.А.** Использование сейсмoeлектрического эффекта 1-го рода в разведочных целях (по результатам лабораторного изучения природных образцов – кернов глубоких скважин) // Геофизический вестник. 2008. № 11. С. 8–12.
- Кузнецов А.В., Соколова И.П., Мороз И.П., Кобзова В.М., Шеремета О.В.** Общие черты проявления сейсмoeлектрических эффектов 1-го и 2-го рода в Саратовском Заволжье, Днепрпетровско-Донецкой впадине и Западной Сибири // Физика Земли. 2007. № 4. С. 48–52.
- Майбук З.Я.** Триггерный механизм нелинейных механоэлектрических преобразований в орудненных разломах // Физика Земли. 2006. № 10. С. 51–64.

**Озерков Э.Л.** Пути использования сейсмoeлектрического воздействия полей при прогнозировании залежей нефти и газа // Сб. докл. Междунар. конф. по разведочной геофизике. М., 1992.

**Потапов О.А., Лизун С.А., Кондрат В.Ф. и др.** Основы сейсмoeлектроразведки. М.: Недра, 1995. 268 с.

**Светов Б.С.** Геоэлектромагнитные исследования по грантам РФФИ // Материалы РАН 1997–2007. М.: РФФИ, 2008.

**Светов Б.С.** Основы геоэлектрики. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 656 с.

**Тамм И.Е.** Основы теории электричества. 7-е изд. М.: Наука, 1976. 617 с.

**Титов К.В.** О влиянии поверхностной проводимости на электропроводность горных пород // Электронный журнал "ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ" <http://zhurnal.aep.relarn.ru/articles/2003/091.pdf>

**Филатов В.В., Полетаева Н.Г.** Об изучении структуры водоносных коллекторов методами геофизической ЯМР-томографии // Геология и геофизика. 1998. № 4. С. 54–62.

**Шайдулов Г.Я., Романова Г.Н., Ярыгина О.Л.** О действии акустического излучения на двойной электрический слой в ионопроводящей среде // J. SFU. Mathematics & Physics. 2012. N 5 (1). P. 132–139.

**Шевченко А.А.** Скважинная сейсморазведка: Учеб. пособие. М.: Изд-во РГУНиГ, 2002. 129 с.

**Earnshaw S.** On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether // Transactions of the Cambridge Philosophical Society. 1842. V. 7. P. 97.

**Fallini P.** L' Elettrosmosi nel cantiere edile [электронная публикация – открытый доступ]. – <http://www.elettrosmosi.it>. 1991.

**Nigmatullin P.P., Dissado L.A., Soutougin N.N.** A fractal pore model for Archie's law in sedimentary rocks // Phys. D. 1992. V. 25. P. 32–37.

**Pride S.** Electro seismic Wave Properties // J. Acoust. Soc. Amer. 1996. V. 100, N 3.

*Поступила в редакцию 16 октября 2013 г.,  
в окончательном варианте – 30 ноября 2013 г.*

#### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

**МАНШТЕЙН Александр Константинович** – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН.  
E-mail: MansteinAK@ipgg.sbras.ru

**НЕСТЕРОВА Галина Владимировна** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН.

**САЕВА Ольга Петровна** – ведущий инженер лаборатории геоэлектрохимии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН.

**ФИЛАТОВ Владимир Викторович** – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Сибирского НИИ геологии, геофизики и минерального сырья.  
E-mail: Filatov@sniiggims.ru