

О ПРИКЛАДНОМ ЗНАЧЕНИИ ГЕОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ПРИ РЕШЕНИИ НЕФТЕГАЗОПОИСКОВЫХ И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

В.Ю. Шигаев

Саратовский государственный университет, 410012, Саратов, ул. Астраханская, 83, Россия

Рассмотрены вопросы использования геоэлектрохимических эффектов при проведении нефтегазопроисковых и инженерно-геологических исследований. Выявлено аномально высокое содержание подвижных форм микроэлементов в контуре Жирновского нефтегазового месторождения, в 1.5—2 раза превышающее фоновые значения. Приведены результаты электроукрепления маастрихтских глин, являющихся зеркалом скольжения оползней в пределах Нижнего Поволжья. Зафиксирован рост прочностных свойств более чем в 2 раза.

Электрообработка, геоэлектрохимические эффекты, нефтяная залежь, содержание микроэлементов, прочностные свойства, электроукрепление.

ELECTROCHEMICAL EFFECTS IN ROCKS: PETROLEUM EXPLORATION AND ENGINEERING-GEOLOGICAL APPLICATIONS

V.Yu. Shigaev

The use of electrochemical effects in petroleum exploration and engineering-geological applications is discussed with reference to the Zhirnovsky oil and gas field, where mobile forms of trace elements are 1.5—2 times above the background. Electrochemical strengthening applied to Maastrichtian shales, which are sliding planes of landslides in the Lower Volga area, increased their stiffness by a factor of 2 or more.

Electrolysis, electrochemical effects, oil accumulation, concentrations of trace elements, stiffness, electrical stiffening

В процессе электрохимических реакций в горных породах (в особенности в непосредственной близости от электрода) происходят качественные и количественные изменения физико-химических свойств [Кублановский и др., 1978; Рысс, 1983]. Эти изменения фиксируются главным образом в виде аномально высокого содержания подвижных форм микроэлементов в изучаемом материале и образования горных пород с измененными физико-химическими свойствами. Рассмотрим значение геоэлектрохимических эффектов при решении нефтегазопроисковых и инженерно-геологических задач.

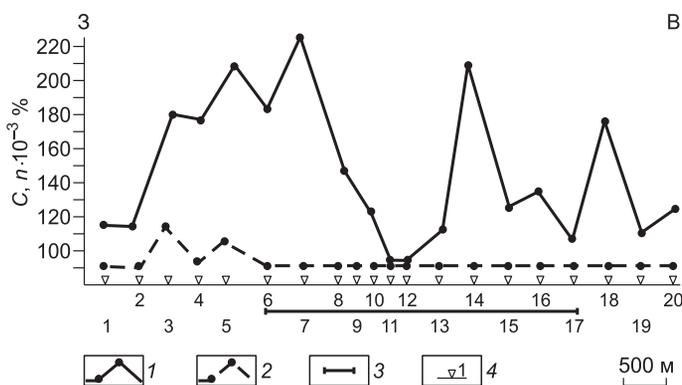
Упомянутые ранее в литературе примеры успешного применения геоэлектрохимических исследований при поисках нефти и газа [Васильева, Ворошилов, 1995] относятся к полевым модификациям методов. Приводимые в настоящей работе результаты получены экономически недорогим лабораторным способом геоэлектрохимического прогнозирования нефтегазоносности [Патент..., 2002].

В его основе лежит признание вертикальной миграции углеводородов (УВ). Оценки показывают [Соколов, 1956], что даже при слабом диффузионном массопереносе за геологическое время могут быть рассеяны либо сброшены в окружающую среду большие объемы природных газов. Вместе с УВ мигрируют микроэлементы, содержащиеся в различных фракциях нефти (Ni, V, Co, Cu, Zn, Mo и др.) [Путиков, Духанин, 1994]. Подвижные формы последних проникают во вмещающие породы, распространяясь к земной поверхности, где образуют вторичные ореолы рассеяния. Образование указанных ореолов в породах объясняется их повышенной сорбционной емкостью, зависящей от количества и состава глинистого материала и изменяющейся от 3—15 до 150 мг-экв. на 100 г породы, согласно литологического ряда песок—алеврит—глина. Особенно интенсивно эти процессы проявляются в пределах месторождений УВ с неглубоким залеганием в сейсмически-активных областях, где наиболее вероятны активные явления массопереноса.

Эффект аномально высокого содержания подвижных форм микроэлементов над залежами наблюдался автором на ряде площадей. При этом было установлено [Шигаев, 2007], что их количество в контуре месторождений значительно выше, чем за их пределами. Для примера остановимся на результатах, полученных на Жирновском нефтегазовом месторождении (юго-восточный склон Воронежской антеклизы). Интерес к данному объекту исследований обусловлен особенностями его геологического строения и формирования. Месторождение представлено 28 залежами на глубине 398—2315 м. Большая их часть

Рис. 1. Графики распределения суммарной концентрации микроэлементов (Жирновское месторождение).

1 — распределение концентрации после пропускания электрического тока; 2 — распределение исходной суммарной концентрации; 3 — границы месторождения; 4 — геоэлектрохимические пикеты, их номера.



располагается в однородных карбонатных породах, экранированных плотными песчано-глинистыми породами или монолитными известняками. Образование залежей происходило во многом благодаря наличию вертикальной миграции УВ из более глубоких горизонтов в менее глубокие. Данное обстоятельство является благоприятным для постановки геоэлектрохимических исследований по самым верхним горизонтам.

Работы на Жирновской площади проведены по профилю, пересекающему изучаемую территорию в широтном направлении. Пробы отбирались из почвенного слоя с глубины 40 см. В них определялось содержание тяжелых металлов (Mn, Pb, Sn, Cr, Ni, V, Mo, Cu, Ti, Co, Ba) до и после электрообработки. Для проведения эксперимента образцы горной породы массой 250—300 г дробились до крупности зерна 0.05 мм, насыщались дистиллированной водой, загружались между двумя графитовыми электродами в электрохимическую ячейку, представлявшую собой пластмассовый стаканчик объемом 90 см³. На электроды подавался постоянный электрический ток. После пропускания тока из приэлектродных участков отбирался материал (навеска массой 2 г), который высушивался, перетирался и подвергался полуквантовому спектральному анализу с целью изучения продуктов извлечения [Шигаев, 2003].

Полученные данные проиллюстрированы на рис. 1 в виде изменения по профилю исходной (до пропускания тока) суммарной концентрации названных элементов ($C_{исх}$) совместно с их суммарной концентрацией после электрического воздействия ($C_{ток}$).

Анализ распределения $C_{исх}$ и $C_{ток}$ показывает, что амплитуда аномалии $C_{исх}$ по абсолютной величине ниже $C_{ток}$ и не превышает $110 \cdot 10^{-3} \%$. На профиле она обнаружена на фланге месторождения (ПК 3 и ПК 5). $C_{ток}$ по профилю распределяется иначе. Ее максимальные значения (210 — 220) $\cdot 10^{-3} \%$ на ПК 14 и ПК 7) совпадают с центральной частью залежи. Из рис. 1 видно, что аномалия повышенных значений $180 \cdot 10^{-3} \%$ на ПК 3 и ПК 18 в плане несколько выходит за границы месторождения. Это связано с наличием здесь зон повышенных и пониженных механических напряжений, через которые осуществляется вынос вещества, подвижных форм микроэлементов из залежей в вышележащие горизонты. По мнению исследователей [Воробьев и др., 1999], эти зоны соответствуют границам месторождений УВ, а их поперечные размеры зачастую превышают поперечные размеры структур [Белоусов, Гзовский, 1964]. В центральной части профиля (ПК 11 и ПК 12) зафиксирован минимум $C_{ток} = 80 \cdot 10^{-3} \%$. Этот факт объясняется периодическим (во время паводка) эрозийным воздействием р. Медведица на почвенный слой в районе этих пикетов.

Полученные результаты косвенно подтверждают вертикальную миграцию УВ из залежей к земной поверхности. На это указывает совпадение контуров зон с аномально высокими значениями концентраций микроэлементов в почвенном слое над залежами с границами месторождения. Эти данные согласуются с геологическим строением многопластового Жирновского месторождения и с теоретическими представлениями о возможном механизме формирования ореолов рассеяния над ним [Путиков, Духанин, 1994].

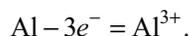
Наряду с эффектом принудительного накопления подвижных форм микроэлементов в приэлектродных частях происходит изменение физико-химических свойств исходной породы, связанное с процессами взаимодействия с ней электрического тока.

Изучение этих изменений проведено в лабораторных условиях на образцах глин маастрихтского возраста, образующих зеркала скольжения оползней, развитых в Саратовском Правобережье. Отобранные образцы представляют собой неравномерно карбонатную, опоковую, алевроитовую, шиповатую глинистую породу темно-серого цвета.

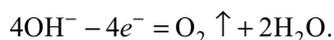
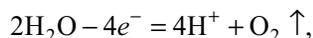
Эксперименты проводились в пластиковой ванне размерами $36 \times 14 \times 5$ см, в которую с сохранением их естественной влажности загружались и тщательно уплотнялись изучаемые образцы. В качестве электродов использовались алюминиевые пластины площадью 70 см^2 , подключенные к источнику постоянного тока и закрепленные на торцевых участках ванны. Здесь же располагались дренажные отверстия для отвода электроосмотического фильтрата.

Укрепление глинистого материала под действием внешнего электрического поля идет в несколько этапов [Воронкевич и др., 1981]. На начальной стадии при снятии внешнего воздействия наблюдается обратимый процесс электроосмотического водопонижения. Далее, с течением времени, в глинах происходят необратимые электрохимические и обменные процессы, которые обуславливаются электролитическими и химическими реакциями вблизи электродов.

В анодной зоне в результате процессов электролиза происходит накопление материала электрода за счет его окисления и растворения. В случае применения алюминиевых электродов на аноде процесс окисления выглядит так:



Здесь же происходит выделение кислорода при электрохимическом окислении воды и разрядке на аноде анионов OH^- :

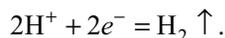


В свою очередь, ионы алюминия, взаимодействуя с водой, образуют гидроксид алюминия, способствующий повышению концентрации ионов водорода, что ведет к подкислению среды:

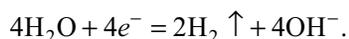


По мере осушения анодной зоны гидроокись алюминия накапливается, уплотняется и кристаллизуется, упрочняя грунт.

В катодную зону под действием постоянного электрического тока передвигаются ионы водорода щелочных и щелочноземельных металлов, попавших в электролит в ходе электролиза из породообразующих глинистых минералов. Ионы водорода восстанавливаются на катоде с выделением водорода в виде газа:



Здесь же наблюдаются процессы электролитического восстановления воды и катода, подщелачивание среды за счет накопления ионов гидроксила:



Существование кислой и щелочной зон в глинистых породах при электрообработке оказывает большое влияние на ход обменных реакций. Из них выщелачиваются растворимые в воде кислоты и кислые соли (анодная зона), гидроокиси щелочных металлов (катодная зона). Одновременно в условиях свободного доступа углекислоты воздуха в щелочной среде идут процессы карбонизации гидроокислов щелочноземельных металлов, приводящие к увеличению прочности и водостойкости закрепляемой породы.

Не менее важными для эффективного электроукрепления являются процессы вхождения в обменный комплекс глин катионов Al^{3+} , вместо одновалентных Na^+ и K^+ . Они приводят к концентрационной коагуляции мелких глинистых частиц, когда из-за большего размера ионов Al^{3+} по сравнению с размерами ионов Na^+ и K^+ в присутствии электролитов сжимается диффузионная обкладка двойного электрического слоя. Потенциал поверхности частиц при этом остается постоянным. Напомним, что коагуляция — это процесс необратимого нарушения агрегативной устойчивости, когда вследствие сжатия диффузных оболочек двойного электрического слоя глинистых частиц до некоторой критической толщины энергия отталкивания частиц уравнивается с энергией притяжения. После этого любое столкновение частиц под действием постоянного электрического тока приводит к их слипанию и формированию больших агрегатов.

Рассмотренные процессы приводят к упрочнению породы, однако оно происходит неравномерно ввиду разных условий протекания реакций в анодных и катодных областях. Поэтому в укрепленной породе выделяют различные зоны: анодную — наиболее осушенную и упрочненную; катодную — наиболее обводненную и слабую; промежуточную — незакрепленную, в которой происходят процессы, характерные для анодной зоны.

В эксперименте изменение механических свойств закрепляемых пород отслеживалось с помощью прибора Вика, предназначенного для определения времени схватывания тампонажных растворов при цементировании скважин. Глубина погружения иглы прибора является косвенным показателем степени увеличения прочностных свойств глины. Время пропускания электрического тока, необходимое для получения нужной твердости обрабатываемого материала, определяется по формуле [Патент..., 2004]:

Таблица 1. Результаты геоэлектрохимического укрепления маастрихтских глин

Время укрепления, ч	Относительное удаление точки замера от катода, отн. ед.	Рост прочностных свойств ($1/k$), отн. ед.	Объемная масса образцов, г/см ³	Весовая влажность образцов, %	Число пластичности образцов, %
2.5	0.1	1.56	1.81	8.15	6.1
	0.5	1.08			
	1	1.43			
4	0.1	1.64	1.52	5.95	14.5
	0.5	1.16			
	1	1.52			
5	0.1	1.69	1.50	5.35	15.8
	0.5	1.21			
	1	1.66			
7	0.1	1.75	1.48	4.75	17.0
	0.5	1.3			
	1	1.82			
8	0.1	1.9	1.46	4.50	19.8
	0.5	1.37			
	1	2.1			

$$t = \frac{1}{I} \cdot (1 - k),$$

где t — время пропускания постоянного электрического тока (мин); I — сила тока (А); k — относительный коэффициент механической прочности исследуемой среды, представляющий собой отношение

$$k = h_t / h_0.$$

Здесь h_0 — глубина погружения иглы прибора в исходном образце, h_t — в том же образце после пропускания электрического тока.

Напряжение равнялось 240 В при силе тока 0.2 А. Замеры механических свойств проводились на исходных образцах (до пропускания тока), а также через 2.5, 4, 5, 7 и 8 ч от начала работ. Равномерное закрепление породы (уменьшение объема катодной и промежуточной зон) достигалось сменой полюсов питающей установки (с периодом 1 ч). Измерения осуществлялись на различных относительных расстояниях (l/l_0) от электрода, который первоначально являлся катодом. Здесь l — расстояние от катода до места замера, l_0 — расстояние между электродами. Первоначально образцы маастрихтских глин имели объемную массу 1.83 г/см³, весовая влажность 13.6 % и характеризовались числом пластичности 0.9 %. Результаты замеров этих же образцов после электрообработки указывают на изменение физических свойств (табл. 1).

Так, за 8 ч эксперимента весовая влажность исследуемого образца уменьшается с 13.6 до 4.5 %, что сопровождается снижением его объемной массы на 20.2 % (от 1.83 до 1.46 г/см³). Кроме того, увеличивается число пластичности от 0.9 до 19.8 %. Эти изменения объясняются связыванием глинистых частиц в агрегаты, их перекристаллизацией, обезвоживанием, что и приводит к укреплению глин.

Проявление рассмотренных эффектов сопровождается резким изменением кислотно-щелочных параметров горных пород, находившихся в поле постоянного электрического тока [Патент..., 2005].

Замеры щелочности-кислотности проводились до электрического воздействия в исходных образцах ($pH_{исх}$), а также последовательно через 20, 40, 60, 90 мин после начала пропускания тока ($pH_{ток}$) в прикатодном и прианодном участках и на различном относительном удалении от катода (l/l_0), равном 0.9,

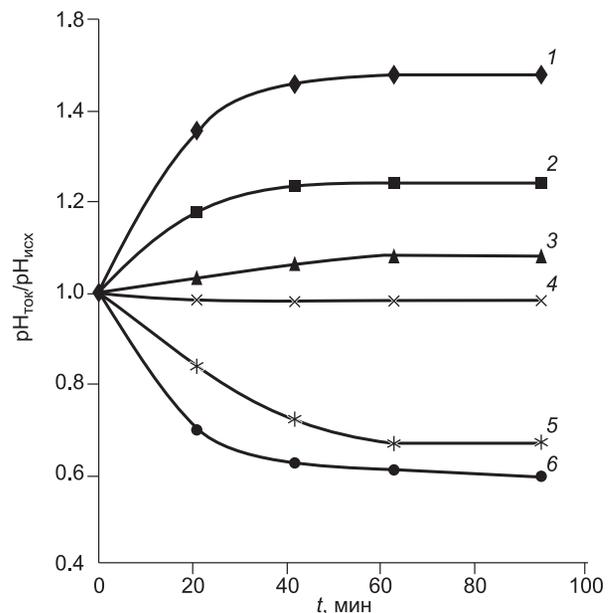


Рис. 2. Геоэлектрохимические годографы.

1 — прикатодный участок; 2–5 — l/l_0 : 2 — 0.9, 3 — 0.3, 4 — 0.15, 5 — 0.1; 6 — прианодный участок.

Таблица 2.

Теоретическое и экспериментальное изменение рН изучаемых пород при различном времени пропускания электрического тока

Время, мин	рН _{ток} /рН _{исх}			Рассчитанный <i>p</i> -уровень	
	Теоретические данные при $\delta = 0.5$ см	Теоретические данные при $\delta = 1.5$ см	Данные эксперимента	$\delta = 0.5$ см	$\delta = 1.5$ см
20	1.48	1.41	1.36	0.068	0.12
40	1.53	1.45	1.44		
60	1.56	1.48	1.48		
90	1.58	1.51	1.48		

0.3, 0.15, 0.1. В результате была определена зависимость параметра $\text{pH}_{\text{ток}}/\text{pH}_{\text{исх}}$ от времени воздействия током. Характер зависимости для всех исследованных образцов типичен, поэтому в качестве примера на рис. 2 приведены результаты на одном из них. Видно, что основные изменения этого параметра на пикетах происходят в первые 40 мин, где наблюдается либо рост рН (на относительном расстоянии от катода 0.9, 0.3, 0.15 и в прикатодном участке), либо его снижение (на относительном расстоянии 0.1 и в прианодном участке). Во временном интервале 40—60 мин изменений щелочности—кислотности не фиксируется. Дальнейшее пропускание электрического тока дополнительной информации по динамике водородного показателя не дает, что связано со снижением интенсивности электрохимических процессов в изучаемой среде.

Экспериментальные материалы согласуются с результатами теоретических расчетов величины рН в прикатодном слое, которые были проведены по схеме, предложенной В.С. Кублановским с соавторами [1978]. Эти данные для различной толщины прикатодного слоя δ сгруппированы в табл. 2 совместно с результатами экспериментальных замеров.

Различия теоретических и экспериментальных данных оценены с использованием аппарата непараметрических статистических методов. Его рекомендуется применять, если анализируемый признак является количественным, но вид его распределений в выборках не рассматривался. Среди них наибольшую мощность расчетов, приводимых по программам STATISTICA, имеет критерий Вилкоксона [Боровиков, 2003], позволяющий оценить статистическую значимость изменений в двух зависимых выборках. Считается, что различия в этих выборках статистически значимы, если рассчитанный *p*-уровень меньше уровня значимости $\alpha = 0.05$. В нашем случае расчетный *p*-уровень превышает $\alpha = 0.05$ (см. табл. 2). Таким образом, различия между теоретическим и практическим материалами статистически незначимы, что говорит о высоком качестве экспериментальных измерений.

Выводы. Результаты исследований геоэлектрохимических эффектов, изложенные в работе, указывают на возможность их использования при решении прикладных задач нефтяной геофизики и механики грунтов. Установлено удовлетворительное совпадение аномалий подвижных форм микроэлементов в почвенном слое с контуром нефтегазоносности Жирновского месторождения. Эти аномалии становятся более интенсивными по мере приближения к продуктивным горизонтам, где сильнее развиты эпигенетические изменения горных пород, произошедшие под действием УВ. Некоторые из них имеют ограниченное распространение и не выходят на поверхность, что затрудняет их обнаружение. Решение этой проблемы видится в увеличении глубины исследований, связанной с изучением шлама и керна геохимических и глубоких скважин.

Геоэлектрохимическое укрепление неконсолидированных горных пород, например, глин, слагающих верхнюю часть геологического разреза в Нижневолжском регионе, возможно, путем введения в них различного рода коагулирующих добавок (например поверхностно-активных веществ). Эти работы необходимо дополнить мониторингом щелочности—кислотности горных пород.

ЛИТЕРАТУРА

- Белоусов В.В., Гзовский М.В.** Экспериментальная тектоника. М., Недра, 1964, 119 с.
- Боровиков В.Б.** STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов. 2-е изд. СПб., Питер, 2003, 688 с.
- Васильева В.И., Ворошилов Н.А.** Оценка перспективности площадей на нефть геоэлектрохимическими методами // Геофизика, 1995, № 2, с. 29—36.
- Воробьев В.Я., Огаджанов В.А., Солонин С.В.** Связь геодинамики и напряженного состояния земной коры Восточно-Европейской платформы с нефтегазоносностью // Геофизика, 1999, № 4, с. 52—56.
- Воронкевич С.Д., Евдокимова Л.А., Злочевская Р.И., Гончарова Л.И., Огородникова Е.Н., Сергеев В.И.** Техническая мелиорация пород. М., Изд-во Моск. ун-та, 1981, 342 с.
- Кублановский В.С., Городынский А.В., Белинский В.Н., Глушак Т.С.** Концентрационные изменения в приэлектродных слоях в процессе электролиза. Киев, Наук. думка, 1978, 212 с.

Патент 2178189 РФ, МКИ⁷ G 01 V 3/00. Способ геоэлектрохимического прогнозирования нефтегазоносности / Шигаев В.Ю., Михеев С.И., Шигаев Ю.Г. 2002, Бюл. № 1, с. 393.

Патент 2236314 РФ, МПК⁷ В 09 В 3/00, Е 02 Д 3/11. Способ литификации вязкопластичных промышленных отходов / Шигаев В.Ю., Шигаев Ю.Г., Плюснин Д.А. 2004, Бюл. № 26, с. 417.

Патент 47365 РФ, МПК⁷ С 25 В 9/00. Устройство для мониторинга физико-химических параметров образцов горных пород / Шигаев В.Ю., Шигаев Ю.Г., Плюснин Д.А., Карпенко А.В. 2005, Бюл. № 24, с. 685.

Путиков О.Ф., Духанин А.С. О возможном механизме формирования «струйных» ореолов рассеяния // Докл. РАН, 1994, т. 338, № 2, с. 219—221.

Рысс Ю.С. Геоэлектрохимические методы разведки. (Введение в геоэлектрохимию). Л., Недра, 1983, 255 с.

Соколов В.А. Миграция газа и нефти. М., Изд-во АН СССР, 1956, 352 с.

Шигаев В.Ю. Геоэлектрохимический метод поисков месторождений углеводородов // Изв. вузов. Геология и разведка, 2003, № 6, с. 64—68.

Шигаев В.Ю. О взаимосвязи геоэлектрохимических аномалий с нефтегазоносностью // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, 2007, № 7, с. 11—15.

*Рекомендована к печати 1 апреля 2009 г.
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию 6 июня 2008 г.,
после доработки — 26 февраля 2009 г.*