

УДК 550.83+552.5+553.98

## ПРИЧИНЫ ПОНИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В НИЗКООМНЫХ КОЛЛЕКТОРАХ

© 2014 г. И.А. Мельник

*Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья,  
Томский филиал, г. Томск, Россия*

На основе трехкомпонентной физико-геохимической модели электропроводности песчаника, включающей раствор электролита, глинистый двойной электрический слой и поверхностный высокопроводящий слой, образованный в результате вторичных геохимических процессов, определено уравнение электрической проводимости в низкоомных коллекторах. Показано, что изменение электрической проводимости поверхностного слоя, обусловленное зарядами преобразованных минералов, по своей значимости может быть определяющей компонентой общей электрической проводимости породы.

**Ключевые слова:** низкоомный коллектор, каротаж, удельное электрическое сопротивление, вторичные геохимические преобразования породы.

### Введение

Миграция флюидов (различных газов, кислот, паров воды, углеводородов и т.д.) обусловлена дизъюнктивными и пликративными тектоническими процессами [Соколов, Абля, 1999]. В зонах дизъюнктивных дислокаций восходящий поток по разломам приводит к образованию многопластовых месторождений [Конторович, 2002]. В свою очередь, пликративные деформации развивают трещиноватость в жестких породах типа песчаников, которые в паре со служащими покрышками более пластичными глинами образуют коллектор. Миграция химически агрессивных флюидов и заполнение ими сформированных коллекторов влечет за собой развитие наложенных эпигенетических процессов, в результате которых горные породы испытывают вторичные химические преобразования [Лебедев, 1992].

В результате метаморфизма полимиктовых песчаных коллекторов образуются такие высокопроводящие минералы как пириты, халькопириты, крустифицированные хлориты и другие железосодержащие минералы, понижающие удельное электрическое сопротивление пласта [Ежова, 2006; Заринов, Сонич, 2001]. На сопротивление пласта могут оказывать влияние также и глинистые минералы с повышенной поверхностной электропроводностью, образовавшиеся в результате процессов наложенного эпигенеза [Семенов и др., 2006]. Это может приводить к ошибке определения характера насыщения пласта, когда продуктивный пласт (так называемый низкоомный коллектор) по данным геофизических исследований скважин интерпретируется как водонасыщенный.

Например, анализ причин высокой электропроводности верхнеюрских и нижнемеловых отложений Оленьего, Онтонигайского, Катальгинского, Западно-Крапивинского, Северного, Первомайского, Даненбергского и ряда других месторождений Томской области позволил определить условия влияния твердой фазы породы на электрическое сопротивление пласта [Чикишев и др., 2006а; Шишкин, Резниченко, Дорогиницкая, 2006]. Авторы названных работ утверждают, что влияние железосодержащих

минералов на сопротивление пласта возможно только при значительном (>5%) содержании этих минералов и их определенном распределении в объеме породы.

Те же авторы в другой своей работе [Чикишев и др., 2006б] назвали ряд факторов, влияющих на электрическое сопротивление пласта, которые не учитываются геофизиками: качественное и количественное содержание и распространение глинистой компоненты в породе; наличие проводящих минералов; текстура и структура породы; размеры и форма зерен. Воздействие перечисленных факторов может быть весьма существенным.

Анализ работ по изучению причин образования низкоомных коллекторов, проведенных разными авторами, выявил проблему определения оценочного параметра по влиянию электропроводящей твердой фазы на удельное электрическое сопротивление породы. При этом не была установлена зависимость общего электрического сопротивления коллектора от характера и содержания высокопроводящих слоев.

В данной работе представлены способ решения возникшей проблемы и реализация нового алгоритма при исследованиях низкоомного верхнеюрского интервала Столбовой площади, расположенной в Томской области вблизи Колтогорского мегапрогиба в северо-восточной части Каймысовского свода.

### Теоретический анализ

Рассмотрим нефтеводонасыщенный коллектор с разными типами проводимости. Электрическая проводимость песчаной породы в коллекторе задается, в основном, остаточным раствором воды (объемной проводимостью электролита в породе  $1/\rho_3$ , где  $\rho_3$  – удельное сопротивление электролита), а также электрическим слоем глинистой компоненты с ионной проводимостью  $1/\rho_{сл}$  ( $\rho_{сл}$  – сопротивление слоя глинистой компоненты). Матрица и углеводороды в данном случае служат изолятором.

При параллельном соединении электропроводящих слоев порового канала, используя уравнение Б.Ю. Вендельштейна [Вендельштейн и др., 1985], получаем измеряемую проводимость:

$$1/\rho = (1 - \phi)/\rho_3 + \phi/\rho_{сл}, \quad (1)$$

где  $\phi$  – доля двойного электрического слоя глинистой компоненты в песчаной породе;  $(1 - \phi)$  – доля объема канала, занимаемого свободным раствором. Однако в этом уравнении обусловленное двойным электрическим слоем сопротивление слоя глинистой компоненты  $\rho_{сл}$  может зависеть еще и от степени геохимического метаморфизма породы, при котором образующиеся ионы, диффундируя и адсорбируясь в двойном электрическом слое, повышают его электропроводность. Например, на нефтегазовой территории распространенный углекислотный метасоматоз может протекать следующим образом [Лебедев, 1992]: калиевый полевой шпат +  $H_2O$  +  $CO_2$  → каолинит +  $K^+$  +  $HCO_3^-$  +  $H_4SiO_4$ ; глиноземный хлорит +  $H_2O$  +  $CO_2$  → каолинит +  $Mg^{2+}$  +  $Fe^{2+}$  +  $H_4SiO_4$  +  $TiO_2$  +  $HCO_3^-$ . Здесь мы видим, что в кислых средах происходит каолинизация как полевого шпата, так и глинистых минералов. Известно, что при вторичной каолинизации увеличивается пористость песчаника [Шалдыбин, 2005], и, что самое важное, образующиеся катионы железа, магния и калия будут диффундировать к отрицательно заряженной глинистой поверхности, увеличивая потенциал двойного электрического слоя и его электропроводность [Мельник, 2013]. При низкой (<30 г/л) минерализации водного раствора двойной электрический слой играет основную роль в электропроводности породы [Добрынин, Вендельштейн, Кожевников, 2004; Гудок, Богданович, Мартынов, 2007].

В щелочной среде, особенно при водонефтяном контакте, в процессе наложенного эпигенеза или в раннем диагенезе в результате преобразования органического вещества в породе образуются сульфиды – пирит, халькопирит. Вкрапления сульфидов в

глинистой компоненте песчаной породы могут значительно снизить общее удельное электрическое сопротивление пласта, что обусловлено низким электрическим сопротивлением названных вкраплений –  $\rho$  пиритов, например, составляет  $\sim 10^{-3} - 10^{-4}$  Ом·м, что на два порядка ниже  $\rho$  водонасыщенных глин.

Исследования разных авторов выявили следующую зависимость: электрическое сопротивление глин прямо пропорционально радиусу капилляра [Гудок, Богданович, Мартынов, 2007] – при замещении грубодисперсной глины более мелкодисперсной компонентой с уменьшением радиуса капилляров  $\rho$  породы уменьшается. При этом, как правило, ёмкость катионного обмена тонкодисперсной глины значительно превышает ёмкость её грубой компоненты (например, ёмкость катионного обмена монтмориллонита  $\sim 80-150$  мг-экв/100 г, а каолинита –  $3-5$  мг-экв/100 г). Отмеченное может быть еще одной причиной снижения удельного электрического сопротивления породы при неизменной глинистости.

Таким образом, в уравнении (1) электропроводность глинистого слоя необходимо разделить на две параллельно соединенные компоненты:

$$\phi/\rho_{сл} = (\phi - \xi)/\rho_{гл} + \xi/\rho_{см}, \quad (2)$$

где  $\xi$  – доля глинистой смеси с минералами повышенной электропроводности;  $\rho_{гл}$  – удельное электрическое сопротивление массовой (основной) глинистой компоненты;  $\rho_{см}$  – удельное электрическое сопротивление глинистой смеси.

Параллельное соединение глинистой компоненты и смеси обусловлено, прежде всего, поверхностным преобразованием, при котором вновь образованные высокопроводящие минералы (например, кристифицированный хлорит или двойной электрический слой, локально обогащенный катионами близко расположенных реорганизованных минералов) распределены по поверхности пор вместе с первичной неизменной глиной. В электрической цепи поверхности твердой фазы породы образуются два параллельных элемента с различным сопротивлением.

В свою очередь, высокопроводящий слой (минералы) не может быть замкнут беспрерывно в одну цепь. Соединение высокопроводящих минералов происходит через массовую глинистую компоненту (например, вкрапления пиритов в глинистом слое). Поэтому образуется смесь минералов, имеющих разные электрические проводимости – высокую и низкую, соответствующую минерализации раствора. Удельное электрическое сопротивление такой смеси будет выглядеть следующим образом:

$$\rho_{см} = \rho_{гл}(\xi - \eta)/\xi + \rho_{вс}\eta/\xi, \quad (3)$$

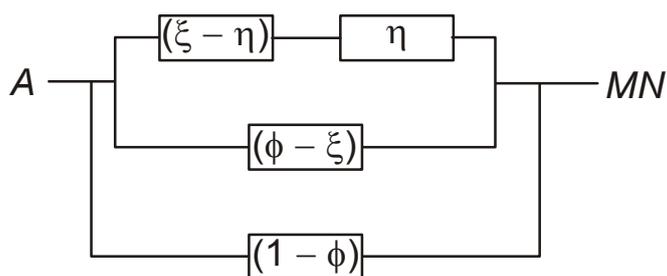
где  $\rho_{вс}$  – удельное электрическое сопротивление высокопроводящего слоя (минерала);  $\eta$  – доля этого слоя в общем объеме смеси.

Итак, подставив зависимости (2) и (3) в формулу (1), мы получим уравнение, которое описывает электрическую проводимость водоминерального состава породы с учетом присутствующих высокопроводящих минералов:

$$1/\rho = (1 - \phi)/\rho_0 + (\phi - \xi)/\rho_{гл} + \xi^2/(\eta\rho_{вс} + (\xi - \eta)\rho_{гл}). \quad (4)$$

В этом уравнении  $(\phi - \xi)$  – доля глинистой компоненты вне смеси, а  $(\xi - \eta)$  – доля глин в смеси (очевидно, что  $\eta < \xi$ ). Уравнение (4) описывает физико-геохимическую модель низкоомного коллектора.

Полученную зависимость можно представить в виде эквивалентной электрической схемы (рис. 1). При отсутствии метаморфизма полевых шпатов, глинистого цемента либо включений пирита в глинистом цементе  $\rho_{вс} = \rho_{гл}$ , и электрическая схема обращается в обычное параллельное включение удельного электрического сопротивления раствора и двойного электрического слоя, т.е. уравнение (4) принимает вид уравнения (1).



**Рис. 1.** Эквивалентная электрическая схема электропроводящих пород эпигенетически преобразованного песчаника

$A, MN$  – электроды установки бокового каротажного зондирования;  $\eta$  – доля высокопроводящего слоя в общем объёме смеси;  $(\phi - \xi)$  – доля глинистой компоненты вне смеси;  $(\xi - \eta)$  – доля глин в смеси;  $(1 - \phi)$  – доля объёма канала

При наличии высокопроводящих минералов в твердой фазе породы и  $\rho_{вс} \ll \rho_{гл}$  получим:

$$1/\rho = (1 - \phi)/\rho_3 + (\phi - \xi)/\rho_{гл} + \xi^2/((\xi - \eta)\rho_{гл}). \quad (5)$$

Зависимость (5) позволяет сделать важное замечание – электропроводность низкоомного коллектора в значительной степени обусловлена не столько концентрацией электропроводящих минералов  $\eta$ , сколько отношением  $\xi^2/(\xi - \eta)$  в третьем члене уравнения, отвечающем за неучтенную электропроводность высокопроводящих минералов в коллекторе. При малой разнице доли глин в смеси (даже при незначительных концентрациях высокопроводящих минералов) величина третьего члена может намного превышать сумму первых двух.

На примере теоретического исследования уравнения (5) покажем, как изменяется удельное электрическое сопротивление водоминерального состава породы  $d\rho$  в зависимости от содержания пиритов и минерализации пласта.

Удельное сопротивление электролита вычисляется по эмпирической зависимости

$$\rho_3 = 0.5M^{0.79} \exp(75/T), \quad (6)$$

где  $M$  – минерализация пласта, г/л;  $T$  – температура пласта, °С [Мельник, 2013]. Определим уравнение зависимости  $\rho_{гл}$  от двух этих параметров.

Известно, что электрическая проводимость диффузионного слоя двойного электрического слоя записывается следующим образом [Яворский, Детлаф, 1979]:

$$1/\rho_{гл} = Fzqu/N_A. \quad (7)$$

Здесь  $F = 96485$  кг/моль – число Фарадея;  $N_A$  – постоянная Авогадро;  $z$  – валентность катиона;  $u$  – линейная скорость движения катионов в диффузионном слое;  $q$  – концентрация катионов в единице объёма двойного электрического слоя. Изменение линейной скорости движения катионов в большей мере обусловлено изменением дзета-потенциала диффузионного слоя [Кобранова, 1986]:

$$u = \varepsilon \zeta E / (4\pi\eta),$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость;  $\zeta$  – дзета-потенциал диффузионного слоя;  $E$  – тангенциальное электрическое поле;  $\eta$  – вязкость раствора. Диэлектрическая проницаемость в основном определяется влажностью породы и соответственно может меняться в зависимости от водонасыщенности, пористости и характера насыщения. Пусть изменение линейной скорости обусловлено переменной величиной дзета-потенциала, который в дифференциальной форме можно получить путем интегрирования объединённого уравнения Пуассона–Больцмана [Верезников, 2011]:

$$\zeta = -\sqrt{\frac{kTM}{\varepsilon\varepsilon_0}} \left( \exp \frac{zF\varphi}{2kT} - \exp \frac{zF\varphi}{2kT} \right), \quad (8)$$

где  $k=8.31$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура, К;  $M$  – концентрация электролита в растворе (минерализация, д. ед.);  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная, равная  $8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $z$  – валентность катиона;  $\varphi$  – потенциал двойного электрического слоя.

Из уравнения (8) вытекает, что в пределах исследуемого интервала песчаника при постоянных температуре, потенциале двойного электрического слоя и концентрации электролита дзета-потенциал в большей степени зависит от валентности катионов – дзета-потенциал резко снижается с ростом  $z$ . Гораздо меньше дзета-потенциал зависит от диэлектрической проницаемости – при уменьшении  $\varepsilon$  его модуль снижается как корень квадратный.

Например, при  $\varphi=50$  мВ,  $T=373$  К и  $z=1$  разность  $\exp \frac{zF\varphi}{2kT} - \exp \frac{zF\varphi}{2kT} = 1.72$ , а при  $z=3$  эта разность составляет 10.3, что в 6 раз увеличивает потенциал диффузионного слоя. В свою очередь, диэлектрическая проницаемость полимиктовых песчаников в зависимости от водонасыщенности, как правило, не меняется более чем в 2–2.5 раза, т.е.  $\sqrt{2.5} \approx 1.6$ .

Базисную поверхность глинистых минералов (для гидрослюд, монтмориллонита, хлорита) можно рассматривать как потенциалопределяющую, несущую отрицательный заряд, образующийся в результате изоморфных замещений. Величина заряда не зависит от концентрации ионов во внешнем растворе, и в данном случае основным носителем заряда в двойном электрическом слое являются некомпенсированные катионы. Для сколов (особенно у каолинитов) атомы алюминия октаэдрического слоя рассматриваются как потенциалопределяющие, а процессы диссоциации соединений алюминия контролируются внешним раствором, т.е. его окислительно-восстановительным потенциалом [Осипов, Соколов, Румянцева, 1989].

Если поверхность заряжена слабо (например, для песчаников  $\varphi \sim 25$  мВ), то уравнение диффузионного потенциала в интегральной форме можно упростить до вида

$$\zeta = \varphi \exp(-kx), \quad (9)$$

где  $k = \sqrt{\frac{2(zF)^2 M}{\varepsilon\varepsilon_0 kT}}$ ;  $x$  – переменная величина, определяющая расстояние до границ

диффузионного слоя [Осипов, Соколов, Румянцева, 1989]. Эффективную толщину диффузионного слоя обозначим как  $\chi = 1/k$ . Интегрируя дзета-потенциал по расстоянию  $x$  (в пределах эффективной толщины) можно определить его усредненное значение.

Преобразовав зависимости (7) и (9) следующим образом

$$\rho_{\text{гп}} = \text{const}/zqu, \quad u \sim \int_0^{\chi} \zeta dx \approx 0.63\varphi\chi = \text{const}\chi = \frac{\text{const}}{z} \sqrt{\frac{T}{M}},$$

в результате подстановки и сокращения  $z$  получим редуцированную формулу для удельного сопротивления электропроводящего поверхностного слоя эпигенетически преобразованного песчаника:

$$\rho_{\text{гп}} = \text{const} \sqrt{\frac{M}{T}} / q. \quad (10)$$

Если глинистая поверхность не несет в себе высокопроводящей компоненты, то при  $q=1$  и  $\rho_{\text{гп}} = \rho$ , можно определить константу удельного электрического сопротивления глин. Проведенные ранее исследования [Добрынин, Вендельштейн, Кожевников,

2004] показали, что при минерализации около 30 г/л и температуре примерно 40 °С равенство  $\rho_{гг}=\rho_3\approx 0.22$  Ом·м сохраняется; в таком случае в формуле (9) имеем  $const=0.254$ .

Покажем изменение  $\rho$  водоминерального состава породы при переменном содержании высокопроводящей компоненты по уравнениям (5), (6), (10) в зависимости от минерализации пласта.

В уравнении (5) доли глинистой компоненты, глинистой смеси и высокопроводящих минералов определялись генератором случайных чисел при  $0.1 < \phi < 0.6$ ,  $\xi < \phi$ ,  $\eta < \xi$ ,  $T=80$  °С и разной минерализации.

Пусть электрическая проводимость водоглинистого состава, не содержащего высокопроводящей компоненты ( $\eta=0$ ), вычисляется на основании преобразованной формулы (5) как  $1/\rho_0 = (1-\phi)/\rho_3 + \phi/\rho_{гг}$ , где  $\rho_0$  – удельное электрическое сопротивление при отсутствии высокопроводящей компоненты. Тогда может быть определена относительная разница удельного электрического сопротивления породы без учета и с учетом высокопроводящей компоненты:

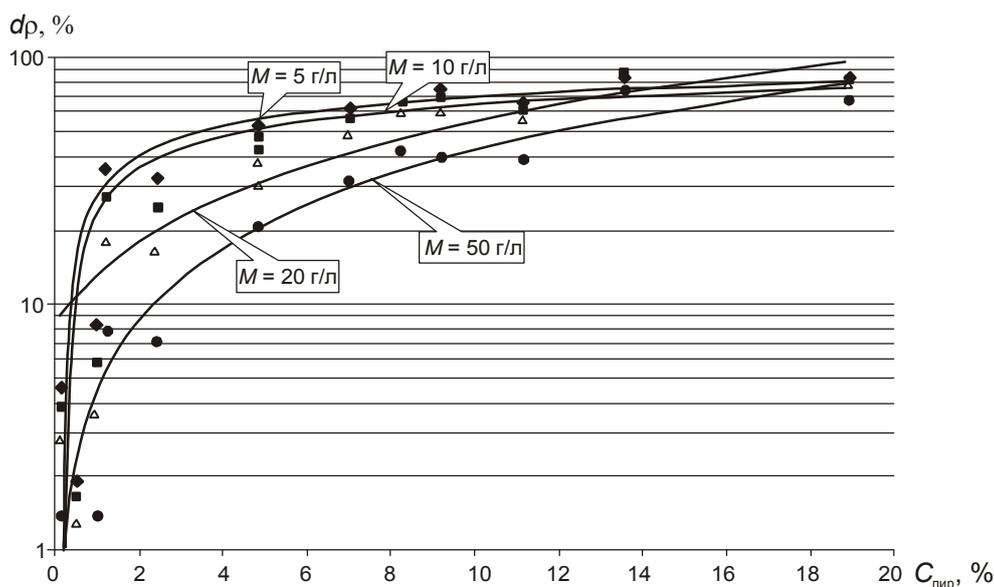
$$d\rho = 100\%(\rho_0 - \rho)/\rho_0, \tag{11}$$

а содержание пирита в породе вычислено по зависимости

$$C_{пир} = 100\% \eta k_{п} \rho_{пир} / \rho_{п} = 48\% \eta,$$

где  $k_{п}=0.22$  д. ед. – общая пористость породы;  $\rho_{пир}=4.8$  г/см<sup>3</sup> – плотность пирита;  $\rho_{п}=2.2$  г/см<sup>3</sup> – плотность породы. Поскольку пирит образуется в поровой среде, занимая долю порового пространства, равную  $\eta$ , его концентрация в основном зависит от этой доли.

Результаты теоретического анализа представлены на рис. 2. Можно видеть, что при минерализации раствора 5 г/л и незначительном (0.1%) содержании пирита удельное электрическое сопротивление снижается на 4.7%; при содержании пирита 1.2% – на 35.4%. С повышением минерализации влияние электропроводящих минералов уменьшается. Так, при  $M=50$  г/л и  $C_{пир}=1.2\%$  относительная разница  $d\rho$  составляет 7.8%. Также видно, что с уменьшением минерализации линейная зависимость  $d\rho(C_{пир})$



**Рис. 2.** Изменение удельного электрического сопротивления породы ( $d\rho$ , %) в зависимости от содержания пирита ( $C_{пир}$ , %) при разной минерализации пласта ( $M$ , г/л). При разной минерализации пласта коэффициент аппроксимации  $R^2$  составляет 0.88 ( $M=5$  г/л); 0.85 ( $M=10$  г/л); 0.89 ( $M=20$  г/л); 0.92 ( $M=50$  г/л)

трансформируется в логарифмическую с соответствующим увеличением степени влияния на  $\rho$  электропроводящих минералов при низких концентрациях.

При геохимических преобразованиях породы (например, при углекислотном метасоматозе) электропроводность двойного электрического слоя в локальных пространственных областях может увеличиться в несколько раз вследствие увеличения количества катионов в диффузионном слое. А в силу того, что содержание глинистой компоненты в породе достаточно велико, его влияние на снижение  $\rho$  будет сопоставимо с влиянием высокопроводящих минералов. Например, при  $M=10$  г/л и 10-процентном содержании глин с увеличенной электропроводностью в случае увеличения зарядов в двойном электрическом слое всего в два раза ( $\rho_{\text{гл}}/\rho_{\text{вс}}=2$ )  $\rho$  породы снизится на 30%.

### Заключение

В заключение сопоставим результаты геофизической интерпретации материалов ГИС скв. №№ 75, 77, пройденных на Столбовой площади, петрографического анализа керн из вскрытого этими скважинами юрского нефтенасыщенного пласта Ю<sub>1</sub> и результаты вычислений по предложенному алгоритму.

Ближайший разлом, секущий юрский горизонт, расположен на расстоянии 0.4 км от скв. № 77 и 1 км от скв. № 75 [Конторович, 2002]. Близость разлома предполагает повышенное проявление интенсивности процессов наложенного эпигенеза, что приводит к значительным образованиям как высокопроводящих минералов, так и вторичных глин, оказывающих влияние на электрические и петрофизические свойства исследуемых пород. Например, сопоставление содержания каолинитов с пористостью песчаника для скв. № 77 выявило их положительную регрессию с коэффициентом корреляции  $R=0.63$  (для скв. № 75 такой зависимости не оказалось). Положительная регрессия содержания каолинитов и пористости свидетельствует об их вторичности, обусловленной процессом углекислотного метасоматоза [Шалдыбин, 2005].

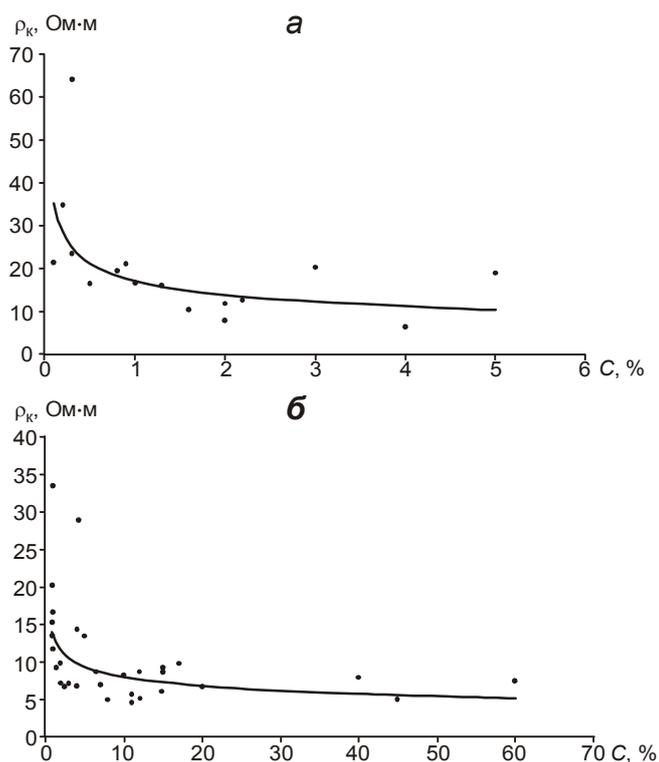
Приведенные на рис. 3 данные демонстрируют изменение кажущегося удельного сопротивления  $\rho_k$  в зависимости от содержания в песчаниках исследуемого пласта пирита (а) и гидрослюд (б). Значения  $\rho_k$  получены при проведении боковых каротажных зондированиях в скв. № 77; процентное содержание названных минералов определено лабораторным способом в Сибирском научно-исследовательском институте геологии, геофизики и минерального сырья (СНИИГГиМС). Хорошо видно, что даже небольшое содержание и пирита, и гидрослюд заметно снижает электрическое сопротивление продуктивного горизонта.

Сравним определения  $\rho$  породы по результатам интерпретации данных ГИС с результатами его вычисления по формуле Дахнова–Арчи для двух типов насыщенных углеводородами интервалов – “нормального” и низкоомного. В первом значения  $\rho$ , определенные двумя способами, совпадают или близки по величине, чего нельзя сказать о втором.

По материалам ГИС скв. № 75 были определены следующие характеристики продуктивного пласта Ю<sub>1</sub>: удельное электрическое сопротивление пласта  $\rho_{\text{п}}(\text{ГИС})=7\text{--}8$  Ом·м, средний коэффициент нефтегазонасыщенности  $K_{\text{нт}}=0.55$  (водонасыщенность  $k_{\text{в}}=0.45$ ), средний коэффициент пористости  $k_{\text{п}}=0.17$ . Вычисляя параметр  $\rho_{\text{п}}$  с использованием уравнения Дахнова–Арчи, имеющего вид  $\rho_{\text{п}}=\rho_{\text{з}}(k_{\text{п}}k_{\text{в}})^{-m}$ , при коэффициенте цементации (извилистости)  $m=1.9$  и  $\rho_{\text{з}}\approx 0.06$  Ом·м<sup>1</sup> получаем  $\rho_{\text{п}}=7.9$  Ом·м, что сопоставимо с  $\rho_{\text{п}}(\text{ГИС})$ .

<sup>1</sup> Удельное электрическое сопротивление воды, определяемое по формуле (6).

**Рис. 3.** Скв. № 77. Зависимость кажущегося удельного сопротивления ( $\rho_k$ , Ом·м) от содержания ( $C$ , %) в песчаном коллекторе юрского нефтенасыщенного пласта Ю<sub>1</sub> пирита (*a*) и гидрослюд (*б*)



Надо отметить, что оба значения  $\rho$  исследуемого пласта выше граничного значения удельного сопротивления –  $\rho_{гр}=5.6$  Ом·м. Известно, что если  $\rho_{п}>\rho_{гр}$ , то в исследуемом интервале (пласте) должны присутствовать углеводороды; если же  $\rho_{п}<\rho_{гр}$ , то он является водонасыщенным.

Тот же пласт в скв. № 77 по данным ГИС отличается пониженным электрическим сопротивлением –  $\rho_{п(ГИС)}=4.6–5.6$  Ом·м, т.е. имеет место соотношение  $\rho_{п}<\rho_{гр}$ , вследствие чего пласт может считаться водонасыщенным. Однако по данным петрофизического анализа керна из этой скважины средний коэффициент нефтегазонасыщенности исследуемого пласта  $K_{нт}=0.62$ , а средний коэффициент пористости  $k_{п}=0.19$ , что говорит о его продуктивности. Удельное электрическое сопротивление  $\rho_{п}$ , определенное по формуле Дахнова–Арчи, составляет 8.9 Ом·м и близко к определенному по той же формуле для скв. № 75. Более низкое по сравнению со скв. № 75 значение  $\rho_{п(ГИС)}$  пласта Ю<sub>1</sub>, полученное для скв. № 77, может быть связано с включениями гидрослюды, сильно понижающей этот параметр (см. рис. 3, б).

Если в уравнение Дахнова–Арчи вместо сопротивления  $\rho_s$  подставить значение  $\rho$ , вычисляемое по формуле (4), учитывающей высокопроводящую компоненту, то можно определить относительное изменение удельного электрического сопротивления породы по формуле (10) в зависимости от содержания высокопроводящих минералов.

При среднем содержании гидрослюды в 5.2% (соответственно  $\eta=0.27$ )  $\rho_{п}$  снижается на 40%. Очевидно, что электрическая проводимость двойного электрического слоя гидрослюды увеличилась вследствие накопления образованных некомпенсированных катионов в диффузионном слое, которое произошло в результате вторичной каолинизации породы. К тому же среднее содержание пирита в 1.5% снижает сопротивление породы еще на 8%. В совокупности названные минералы уменьшают значение  $\rho_{п}$  на 48%:  $\rho_{п(ГИС)}=\rho_{п}-d\rho=8.9-4.3=4.6$  Ом·м.

## Выводы

Таким образом, на основании предложенной физико-геохимической модели низкоомного коллектора в терригенных отложениях получено уравнение (4), позволяющее определять удельное электрическое сопротивление породы с учетом содержания высокопроводящих минералов твердой фазы.

Показано, что в результате процессов наложенного эпигенеза вторично преобразованные минералы могут быть источником некомпенсированных зарядов, накопление которых в диффузионном слое двойного электрического слоя глинистых минералов приводит к понижению электрического сопротивления пласта.

## Литература

- Вендельштейн Б.Ю., Золоева Г.М., Царев Н.В., Дахнов В.Н., Резванов Р.А., Фарманова Н.В., Латышева М.Г., Дьяконова Т.Ф., Шварцман М.Д. Геофизические методы изучения подсчетных параметров при определении запасов нефти и газа. М.: Недра, 1985. 248 с.
- Вережников В.Н. Избранные главы коллоидной химии. Воронеж: Изд-во Воронежского ГУ, 2011. 237 с.
- Гудок Н.С., Богданович Н.Н., Мартынов В.Г. Определение физических свойств нефтеводосодержащих пород: Учеб. пособие для вузов. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. 592 с.
- Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А. Петрофизика (физика горных пород): Учебн. для вузов. М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004. 368 с.
- Ежова А.В. Методика оценки нефтенасыщенности низкоомных коллекторов в юрских отложениях Юго-Востока Западно-Сибирской плиты // Известия ТПУ. 2006. Т. 309, № 6. С.23–26.
- Заринов О.Г., Сониц В.П. Влияние литологии пород–коллекторов на удельное электрическое сопротивление пластов // Геология и геологоразведочные работы. 2001. № 9. С.18–21.
- Кобранова В.Н. Петрофизика. М.: Недра, 1986. 392 с.
- Конторович В.А. Тектоника и нефтегазоносность мезозойско-кайнозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал ГЕО, 2002. 253 с.
- Лебедев Б.А. Геохимия эпигенетических процессов в осадочных бассейнах. Л.: Недра, 1992. 239 с.
- Мельник И.А. Определение коэффициента нефтегазонасыщенности в эпигенетически преобразованных коллекторах на основе материалов ГИС // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2013. № 5. С.33–40.
- Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А. Микроструктура глинистых пород / Под ред. акад. Е.М. Сергеева. М.: Недра, 1989. 211 с.
- Семенов В.В., Мельник И.А., Питкевич В.Т., Сокова К.И., Солонин А.М. Исследование низкоомных коллекторов с использованием данных кернового материала // Геофизика. 2006. № 2. С.42–47.
- Соколов Б.А., Абя Э.А. Флюидодинамическая модель нефтегазообразования. М.: ГЕОС, 1999. 76 с.
- Чишкиев А.Ю., Чишкиев Ю.А., Ковалева Н.П., Резниченко В.А., Жуковская Е.А., Максимов В.П., Голященко А.В. Причина наличия низкоомных коллекторов юрских отложений Каймысовского свода (в порядке обсуждения) // Нефтяное хозяйство. 2006а. № 8. С.42–45.
- Чишкиев Ю.А., Резниченко В.А., Шишкин Р. А., Дорогиницкая Л. М. Проблема выделения продуктивных пластов в коллекторах сложного строения // Международная академическая конференция «Состояние, тенденции и проблемы развития нефтегазового потенциала Западной Сибири», 11–13 октября 2006 г. Тюмень: ФГУП ЗапСибНИИГГ, 2006б. С.275–282.

*Шалдыбин М.В.* Геохимические критерии оценки влияния процессов наложенного эпигенеза на фильтрационно-емкостные свойства обломочных пород-коллекторов (на примере нефтяных месторождений Томской области): Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Томск: ТПУ, 2005. 179 с.

*Шишкин Р.А., Резниченко В.А., Дорогиницкая Л.М.* Выделение типов продуктивных коллекторов по данным геофизических исследований скважин на примере Оленьего месторождения // Нефтяное хозяйство. 2006. № 8. С.38–41.

*Яворский Б.М., Детлаф А.А.* Справочник по физике. М.: Наука, 1979. 940 с.

*Сведения об авторе*

**МЕЛЬНИК Игорь Анатольевич** – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, Томский филиал. 634021, г. Томск, пр. Фрунзе, д. 232. Тел.: (3822) 244-126. E-mail: migranis@mail.ru

## CAUSE OF LOW ELECTRICAL RESISTANCE IN THE LOW-RESISTANCE RESERVOIRS

I.A. Melnik

*Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources,  
Tomsk Branch, Tomsk, Russia*

**Abstract.** The equation of the electrical conductivity is defined in the low-resistance reservoirs on the basis of the three-component physical and geochemical model of electrical conductivity in sandstone (the electrolyte solution, clayey EDL and superficial highly electro-conductive layer, formed as a result of secondary geochemical processes). It is shown that change in the electrical conductivity of the surface layer due to charges of transformed minerals, may be the main defining component of total electrical conductivity of rocks.

**Keywords:** low-resistivity reservoir, logging, electrical resistivity, secondary geochemical transformations of the rocks.