

11 (54) ноябрь 2008

ГОРНЫЕ ВЕДОМОСТИ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

**НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ
СЕЙСМОРАЗВЕДКИ ОГТ И ГЕОЛОГИЧЕСКИХ
ДАННЫХ ПО ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

**КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЕ
И ЛИТОЛОГО-ПЕТРОФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МИНЕРАЛОВ ЖЕЛЕЗА,
ГЛИН И ТЕРРИГЕННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ**

**ТЕХНОГЕННАЯ НАГРУЗКА НА ПОДЗЕМНЫЕ
ВОДЫ, ИХ САНИТАРНОЕ СОСТОЯНИЕ
И СТЕПЕНЬ ЗАЩИЩЕННОСТИ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ**

*«Богатство недр
есть залог величия державы»*

М.В. Ломоносов

КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЕ И ЛИТОЛОГО- ПЕТРОФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МИНЕРАЛОВ ЖЕЛЕЗА, ГЛИН И ТЕРРИГЕННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ (НА ПРИМЕРЕ ПЛАСТОВ **БВ₈ И ЮВ₁ ПОВХОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ. ЧАСТЬ 1)**

М.Ю. Зубков

ООО «ЗапСибГЦ», ТФ ООО «КогалымНИПИнефть», г. Тюмень

АННОТАЦИЯ

На примере тонкослоистых неокомских (пласт BV_8) и верхнеюрских (пласт UV_1) продуктивных отложений Повховского месторождения рассмотрены различные варианты изменения удельного электрического сопротивления (УЭС) в зависимости от соотношения в их составе различных типов пород и классов коллекторов, имеющих различную насыщенность. Предложены способы определения уточненных критических значений УЭС (ρ_{cr}) для различных классов пород-коллекторов с целью решения проблемы локализации низкоомных коллекторов.

CRYSTALLOGRAPHIC AND LITHOLOGICAL AND PETROPHYSICAL BASIS OF IRON MINERALS, CLAYS AND TERRIGENOUS RESERVOIRS ELECTRICAL PROPERTIES (BY THE EXAMPLE OF BV₈ AND UV₁ STRATA OF POVKHOVSKOYE FIELD. (PART 1)

М.Ю. Zubkov

ООО ZapSibGC, ТФ ООО KogalymNIPIneft, Tyumen

ABSTRACT

The different variants of resistivity modification depending on different saturation rocks types and reservoirs classes ratio in their composition were considered by the example of thin-bedded Neokomian (BV_8 stratum) and Upper Jurassic (UV_1 stratum) productive deposits of Povkhovskoye field. For the purpose of task solution of low-resistivity reservoirs localization the methods of resistivity specified critical values (ρ_{cr}) determination were recommended for different classes of container rocks.

ВВЕДЕНИЕ

Характер насыщения терригенных пород-коллекторов Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна (ЗСНГБ) оценивается по данным электрических методов геофизических исследований скважин (ГИС). Однако далеко не всегда по результатам интерпретации электрических методов удается однозначно выделить нефтенасыщенные интервалы. В ряде случаев из отложений, обладающих сравнительно невысокими значениями удельного электрического сопротивления (УЭС), по которым прогнозируется водонасыщенный коллектор, получают притоки нефти, иногда даже безводной. Этот тип коллекторов получил название низкоомных. Реже встречаются другие ситуации, когда из пластов с достаточно высокими значениями УЭС были получены притоки пластовой воды. В этом случае породы-коллекторы можно условно назвать высокоомными.

Понятно, что неверная интерпретация характера насыщения продуктивных отложений ведет в первом случае к пропуску нефтенасыщенных интервалов, а во втором — к неоправданным затратам, связанным с перфорацией и опробованием водонасыщенных интервалов.

Тем не менее из двух типов коллекторов более важными с практической точки зрения являются именно низкоомные коллекторы. Поэтому настоящая публикация посвящена главным образом этому типу пород-коллекторов.

Проблема объяснения феномена низкоомных коллекторов в продуктивных отложениях ЗСНГБ существует достаточно давно. К ней время от времени обращались исследователи различных научно-производственных организаций [4, 7], причем в 2006 г. вышли сразу три публикации, посвященные этой теме [6, 10, 11].

В качестве основных причин, которые могут вызывать снижение сопротивления нефте-водонасыщенных пластов, исследователи называют следующие.

1. Особенности вещественного состава пород [4, 11].
2. Текстурно-структурные особенности пород [4, 11].
3. Характер вторичных изменений минералов обломочной части и цемента [4].
4. Присутствие в порах пород крастификационного хлорита [4].
5. Рост величины минерализации пластовой воды [11].
6. Присутствие металлоконтактных минералов, особенно минералов железа [11].
7. Присутствие в породе гидрослюды [6, 10].
8. Характер насыщения пород (соотношение содержания в них нефти и воды) [6].

Рассмотрим перечисленные выше вероятные причины снижения удельного электрического сопротивления более подробно.

Сразу отметим, что величина минерализации пластовой воды (см. пункт 5) в пределах по крайней мере залежи вряд ли может значительно изменяться, поэтому как возможную причину снижения удельного электрического сопротивления минерализацию пластовых вод мы не рассматриваем.

Попробуем формализовать и классифицировать обсуждаемые возможные причины снижения сопротивления продуктивных отложений.

Для этого примем в качестве аксиом следующие положения.

1. Снижение удельного УЭС породы возможно в случае присутствия в ее составе непрерывной токопроводящей субстанции.

2. Токопроводящей субстанцией могут служить следующие вещества:

- растворы (ионный тип проводимости);
- минералы (например, с электронным типом проводимости);
- их комбинации (смешанный ионно-электронный тип проводимости).

3. Возможны различные способы соединений проводящих субстанций (последовательные, параллельные и последовательно-параллельные соединения).

К приведенным выше трем положениям можно добавить генетический признак, имеющий широкое распространение в геологии, который бы отражал время и механизм образования электропроводящего материала, что позволило бы, исходя из конкретной геологической ситуации, прогнозировать распространение пород с аномальными электрическими свойствами.

В соответствии с принятыми выше положениями и генетическим признаком все перечисленные выше возможные причины снижения сопротивления можно свести к следующим.

1. Наличие в породе электропроводящих минерализованных водных растворов, присутствующих:

- в свободном поровом объеме;
- в поверхностном (двойном ионном) слое;
- в межслоевом пространстве набухающих глинистых минералов.

2. Присутствие в породе токопроводящих минералов, образующих непрерывную электропроводящую систему.

Характер распределения проводящих субстанций в объеме пород определяется их текстурно-структурными особенностями, что и обуславливает анизотропию электропроводности осадочных пород. Обычно токопроводящие компо-

ненты ориентированы параллельно по отношению к наслоению.

По генетическому признаку токопроводящие минералы (вещества) могут образоваться (отложиться) на различных стадиях литогенеза:

- в процессе отложения осадка (стадия седиментогенеза);
- в процессе его диагенеза;
- на стадии эпигенеза.

Следует обратить внимание также на размеры проводящих тел. Это могут быть субмикроскопические пленки связанной или межслойевой воды, включая двойной ионный слой, имеющие толщину от нескольких единиц до первых десятков ангстрем. Микроскопические пленки или слойки водонасыщенных глинистых минералов или пирита толщиной от сотых долей миллиметра до первых миллиметров. Тонкие прослои водонасыщенных глинистых алевролитов и алевритистых глин толщиной в первые миллиметры и сантиметры и так далее. Если толщина электропроводящих прослоев, например, глин и/или глинистых алевролитов приближается к 0,5 м и более, то они начинают достаточно надежно выделяться электрическими и другими методами ГИС, и причина снижения УЭС становится очевидной.

Рассмотрим более подробно возможность снижения сопротивления пород при появлении в их составе перечисленных выше минералов.

Прежде чем перейти к рассмотрению подготовленных материалов, отметим, что их объем оказался слишком велик, чтобы поместить их в одну статью, поэтому они разбиты на две публикации. В первой рассмотрены электрические свойства железосодержащих и глинистых минералов, а во второй дано литолого-петрофизическое обоснование электрических свойств продуктивных отложений на примере пластов БВ₈ и ЮВ₁ Повховского месторождения.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ И ГЛИНИСТЫХ МИНЕРАЛОВ

МИНЕРАЛЫ ЖЕЛЕЗА

Из обыденных представлений следует как будто очевидный факт, что железосодержащие минералы, такие, например, как гидроокислы железа (лимонит), должны иметь низкие УЭС, и, соответственно, при достаточно высоком их содержании в породе (вследствие чего из них формируется непрерывная связанная система) сопротивление породы должно уменьшаться. Однако на самом деле эти представления ошибочны. Достаточно заглянуть в петрофизический справочник, чтобы убедиться, что лимонит,

несмотря на очень высокое содержание в нем железа, является диэлектриком и имеет УЭС 10^4 — 10^7 Омм [8].

Однако имеются минералы железа, которые действительно характеризуются низкими значениями электрического сопротивления, например, магнетит и пирит, их сопротивление составляет 10^{-2} — 10^{-1} и 10^{-4} — 10^{-1} Омм соответственно [8].

Такие резкие различия в величинах сопротивлений рассмотренных минералов объясняются тем, что в составе первого (высокоомного) железо присутствует в трехвалентной форме, а во вторых (низкоомных) — в двухвалентной форме. Поэтому в лимоните оно имеет очень прочные связи с кислородом (все электроны внешней оболочки заняты в ковалентных связях), а во вторых — внешние наименее прочно связанные электроны имеют возможность под действием электрического поля перемещаться и проводить электрический ток. Действительно, даже в составе карбонатных минералов, которые являются «классическими» диэлектриками, присутствие двухвалентного железа ведет к уменьшению сопротивления. Например, сопротивление кальцита равно 10^9 — 10^{10} Омм, а сидерита — всего 10^1 — 10^3 Омм [8].

Таким образом, из рассмотренных выше минералов железа реальными проводниками являются лишь пирит и магнетит. Однако магнетит в осадочных породах ЗСНГБ встречается редко и лишь в виде весьма незначительной примеси, поэтому повлиять на их электрические свойства, а тем более создать непрерывную токопроводящую сеть он в принципе не способен.

Исходя из сказанного, реально на электрические свойства пород из всех известных железосодержащих минералов может повлиять лишь пирит, присутствие которого в породе в виде непрерывно связанной в объеме породы системы способно резко снизить сопротивление рассматриваемой породы.

Действительно, такие случаи реально наблюдались автором статьи. Так, образец песчаника, отобранного из пласта ЮВ₁, одного из месторождений Широтного Приобья с содержанием пирита около 18—20 объем. %, хорошо проводил электрический ток, при включении изготовленного из него цилиндра в электрическую цепь (при последовательном типе соединения) загоралась электрическая лампочка. Однако здесь следует заметить, что сам этот образец не являлся коллектором, т.к. практически все его поровое пространство было заполнено эпигенетическим поровым пиритом, что и обеспечило возникновение в нем непрерывной токопроводящей цепи.

Другим примером резкого снижения электрического сопротивления пород, обусловлен-

ного присутствием пирита, являются отложения тутлеймской свиты Красноленинского района, где в ее составе в верхней части выделяется самая высокорадиоактивная, но в то же время и самая низкоомная пачка. Наши исследования показали, что резкое снижение УЭС рассматриваемой пачки обусловлено присутствием огромного количества очень тонких (толщиной всего около 0.02 мм) протяженных, ориентированных субгоризонтально прослойков пирита. Весовое содержание пирита в этой пачке достигает 35—40 %. УЭС образцов, отобранных из этой пачки, изменяется в пределах 0.02—5.61 Омм (в направлении, параллельном слоистости), а в направлении, перпендикулярном наслоению, оно составляет по результатам одного замера 35.16 Омм [5].

Тем не менее появление даже маломощных (миллиметровых или сантиметровых) электропроводящих прослоев, например представленных рассмотренными выше пиритизированными песчаниками, может в значительной степени снизить сопротивление породы [8, 9].

Попробуем оценить, на сколько изменится удельное электрическое сопротивление нефтенасыщенного песчаного пласта при появлении в его составе маломощного пиритизированного прослоя. Для этого воспользуемся самой простой формулой для определения суммарного УЭС двух параллельно соединенных проводников с высоким (нефтенасыщенный песчаник) и низким (пиритизированный прослой) удельными электрическими сопротивлениями:

$$\rho_n = \rho_{\text{пир}} \rho_h / [\eta \rho_h + (1-\eta) \rho_{\text{пир}}], \quad (1)$$

где:

ρ_n — удельное электрическое сопротивление слоистой породы, состоящей из нефтенасыщенного песчаника с тонкими пиритизированными прослоями;

$\rho_{\text{пир}}$ — удельное электрическое сопротивление пиритизированных прослоев;

ρ_h — удельное электрическое сопротивление нефтенасыщенных песчаников;

η — объемное содержание тонких пиритизированных прослоев.

Для расчетов примем, что сопротивление нефтенасыщенного песчаника равно 20 Омм, а пиритизированных прослоев — 0.05 Омм, причем их объемная доля в песчанике составляет всего 2 %. Тогда УЭС такой породы, вычисленное по приведенной выше формуле, будет равно около 2 Омм, т.е. по данным электрических геофизических методов этот песчаник будет считаться водонасыщенным.

Следовательно, даже небольшая примесь тонких пиритизированных прослоев с низким сопротивлением способна значительно уменьшить

УЭС нефтенасыщенного песчаника. Однако подчеркнем еще раз, что речь идет о непрерывных (протяженных) пиритизированных прослоях, ориентированных субпараллельно слоистости. Если пирит присутствует в породе в виде изолированных включений или микролинзочек, то даже при гораздо более высоком его объемном содержании снижения сопротивления породы не произойдет.

Перейдем теперь к следующей, скорее всего основной, причине снижения сопротивления осадочных пород — ионной проводимости различных типов водных растворов, присутствующих в их поровом пространстве.

Кроме собственно поровых минерализованных вод, осуществляющих «объемную» проводимость, в осадочной породе присутствуют по крайней мере еще два типа проводимости, обусловленной минерализованными водными растворами. Во-первых, двойной ионный слой, ответственный за «поверхностную» проводимость [2, 7, 9, 12]. Во-вторых, межслойевой ионный слой, присутствующий в составе набухающих компонентов глинистых минералов, обуславливающий «межслойную» проводимость, на которую никто из исследователей до настоящего времени не обращал внимания. Поэтому в настоящей публикации мы постараемся достаточно подробно рассмотреть и этот тип проводимости.

Поскольку оба последних вида проводимости связаны с присутствием в составе осадочных пород того или иного количества глинистых минералов и их типом, то рассмотрим основные особенности их кристаллической структуры и строения над проявлением того или иного вида электропроводности.

ГЛИНИСТЫЕ МИНЕРАЛЫ

Из всех глинистых минералов наиболее вероятными проводниками электричества, по данным упомянутых выше авторов, являются гидрослюды [6, 10] и крастификационный хлорит [4].

Сами по себе эти минералы в сухом состоянии являются диэлектриками. Так, удельное электрическое сопротивление гидрослюды составляет порядка 10^9 — 10^{10} Омм [8]. Только благодаря появлению на их поверхности пленки адсорбированной минерализованной воды (двойной ионный слой) происходит снижение сопротивления этих минералов, как, впрочем, и других глинистых минералов. Это явление впервые было объяснено Б.Ю. Венделштейном [2]. Но если это так, то, вероятно, дело не в самих глинистых минералах, а в слое связанной с их поверхностью минерализованной воды.

Возникновение двойного ионного слоя на границе поверхности глинистого минерала —

поровая вода обусловлено нескомпенсированным отрицательным зарядом поверхности глинистых минералов, который, в свою очередь, возникает вследствие изоморфных замещений катионов с большим зарядом на таковые с меньшим положительным зарядом, расположенных в октаэдрическом и тетраэдрическом слоях.

Попробуем разобраться в этом вопросе более детально. Для этого напомним, что в составе пород, слагающих осадочный разрез ЗСНГБ, обычно встречаются следующие глинистые минералы: каолинит, хлорит, гидрослюдя, смешанослойные образования (ССО) и глауконит.

Каолинит $Al_2 [Si_2O_5](OH)_4$

Кристаллическая структура каолинита представляет собой чередование двухслойных пачек, состоящих, в свою очередь, из тетраэдрического и октаэдрического слоев. Тетраэдрический слойложен кремнекислородными тетраэдрами, а октаэдрический — алюмокислородными октаэдрами [1, 3]. В самых крупных полостях октаэдрического слоя располагаются анионы гидроксила (OH^-), которые часто называют химически связанный водой. Отдельные пачки связаны друг с другом слабыми ненасыщенными связями между атомами кислорода, находящимися на поверхности пачек, поэтому у рассматриваемого минерала наблюдается спайность, по которой отдельные листочки легко отщепляются друг от друга (рис. 1).

Для каолинита характерно соответствие химического состава приведенной выше формуле, т.е. в нем, как правило, не наблюдается значимых замещений катионов Al и Si на другие катионы с меньшей валентностью, поэтому на их поверхности не возникает значительного нескомпенсированного отрицательного заряда. Следовательно, обменная емкость их поверхности с водным раствором имеет минимальные среди всех глинистых минералов значения. Поэтому концентрация ионов вблизи поверхности каолинитовых частиц не будет значительно отличаться от таковой в самом водном растворе на значительном удалении от их поверхности, а, значит, поверхностная проводимость адсорбированного на поверхности каолинита слоя воды не будет сильно отличаться от удельной проводимости самого водного раствора.

Хлорит $(Mg, Fe, Al)_6 [(Al, Si)_4O_{10}](OH)_8$

Приведенная выше формула является в известной мере условной, т.к. эпигенетические хлориты, образующиеся в поровом пространстве продуктивных отложений, в отличие от каолинита имеют довольно широкие вариации в наборе катионов, входящих в их состав. Обычно они относятся к классу магнезиально-железистых, приближенная формула которых приведена выше.

Их кристаллическая структура более сложная, чем у каолинита (рис. 2). Основными структурными элементами являются две пачки, одна из которых является трехслойной (талькового типа) и одна однослойная (бруситового типа) [1, 3]. Связь между поверхностью бруситового и соседствующего с ним талькового слоями слабая, поэтому хлориты обладают совершенной спайностью (см. рис. 2).

Обратим внимание на тот факт, что в составе бруситового слоя присутствует Fe^{2+} , причем его концентрация может варьировать в довольно широких пределах вплоть до почти чисто железистого с небольшой примесью магния, а, как мы видели выше, присутствие двухвалентного железа способствует снижению УЭС содержащего его минерала. Поэтому можно предположить, что железистые хлориты должны обладать более низким УЭС по сравнению с магнезиальными. К сожалению, прямые замеры УЭС хлоритов различного состава не были проведены, поэтому сделанное предположение относится пока к разряду гипотетического.

Поскольку в октаэдрическом и тетраэдрическом слоях, входящих в состав трехслойной (талькового типа) пачки, отмечаются изоморфные замещения Al^{3+} на Fe^{2+} и Si^{4+} на Al^{3+} соответственно, то на поверхности этого слоя возникает избыточный отрицательный заряд, который может частично компенсироваться повышенной концентрацией вблизи поверхности хлорита катионов из водного раствора (формируется двойной ионный слой, обуславливающий повышенную поверхностную проводимость породы). Но основная часть Fe^{2+} присутствует в составе бруситового слоя, изоморфно замещая ион магния. Если допустить, что в него также входит небольшая изоморфная примесь Al^{3+} , то бруситовый слой может приобрести слабый нескомпенсированный положительный заряд. В этом случае бруситовый и тальковый слои, обладая противоположными зарядами, сильнее притягиваются друг к другу и величина нескомпенсированного поверхностного заряда уменьшается (см. рис. 2).

Тем не менее в зависимости от того, какой из слоев (талькового или бруситового типов) окажется на поверхности зерна хлорита, вблизи его поверхности возникнет либо нескомпенсированный отрицательный (в первом случае), либо положительный (во втором случае) заряды. Тогда в первом случае у поверхности чешуек хлорита в водном растворе будет отмечаться повышенная концентрация катионов, а во втором — анионов.

Поскольку размеры катионов, например, Na заметно меньше, чем анионов, например, Cl^- (при мерно в 2 раза), то их подвижность, соответственно, будет примерно в 2 раза выше, а, значит,

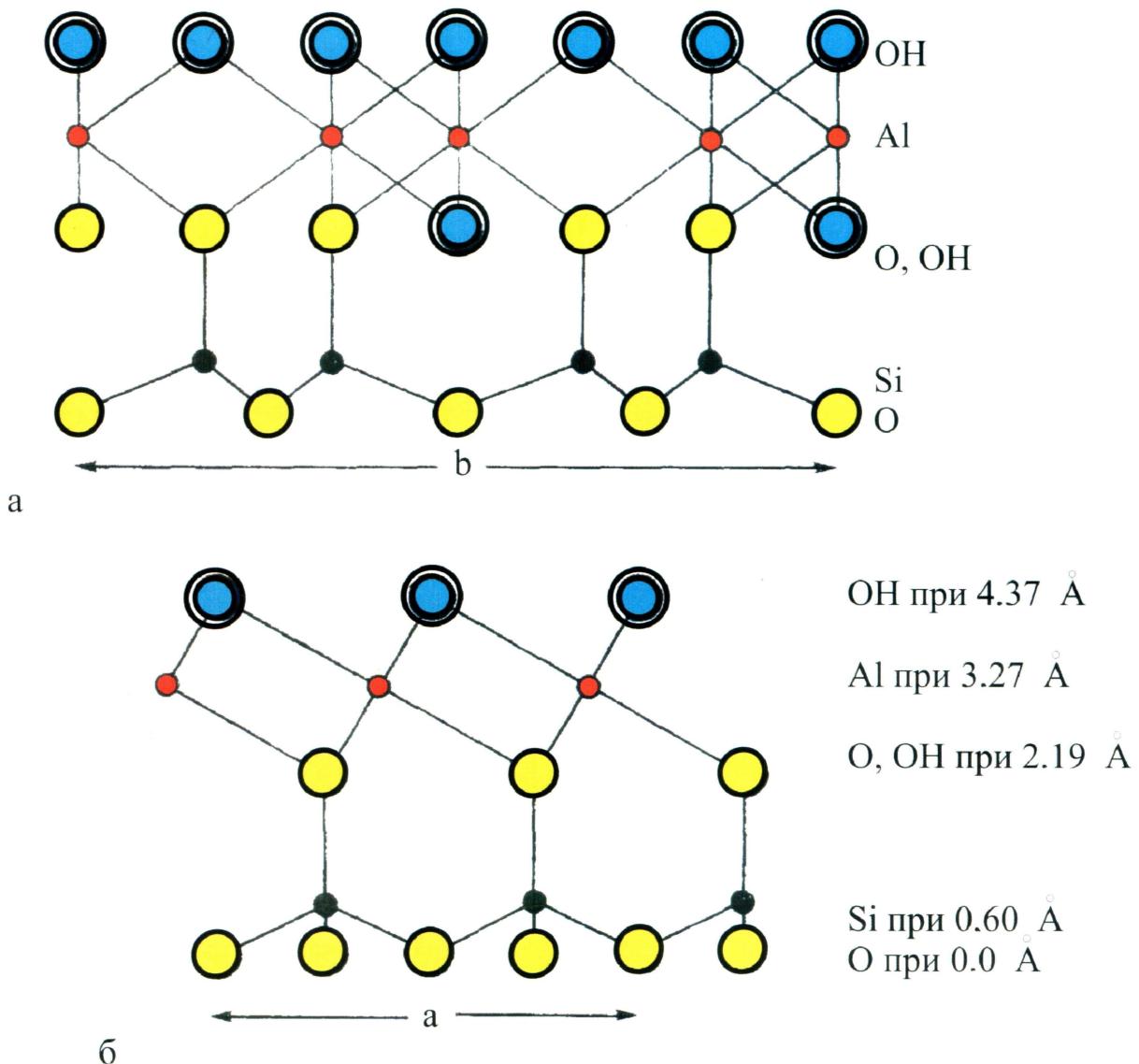


Рис. 1. Каолинитовый слой в проекции перпендикулярно оси b (а) и в проекции перпендикулярно оси a (б) [1]

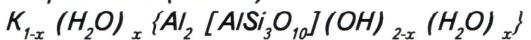
при прочих равных условиях поверхностная проводимость талькового слоя будет выше, чем бруцитового.

Таким образом, в отличие от каолинита на поверхности хлорита в присутствии водного раствора должен образовываться поверхностный слой с повышенной концентрацией ионов, а следовательно обладающий более высокой электропроводностью по сравнению с поровой водой.

Здесь, однако, следует сделать замечание, касающееся концентрации порового раствора. Как известно, существует некоторая критическая концентрация порового раствора, при превышении которой поверхностная проводимость может оказаться ниже, чем собственно самой поровой (пластовой) воды [2, 12]. По данным М.М. Элланского, критическое значение минерализации поровой воды, при которой поверх-

ностная проводимость становится ниже «объемной», близка к 30 г/л и выше [12].

Гидрослюды (иллит)



В основе структуры гидрослюды находятся трехслойные пачки пирофилютого типа (идентичные тальковым, присутствующим в составе хлорита, но с Al вместо Mg). Трехслойные пачки из-за замещения Si^{4+} в тетраэдрических слоях на Al^{3+} и изоморфизма в октаэдрических слоях заряжены отрицательно (рис. 3). Из-за этого между ними появляется положительно заряженный катион K^+ , компенсирующий избыточный отрицательный заряд пачек [1, 3].

В отличие от мусковита гидрослюды, судя по приведенной выше упрощенной химической формуле, содержит в своем составе больше воды и, наоборот, меньше катионов калия, т.е. гидрослюды, по сути, является гидролизованной

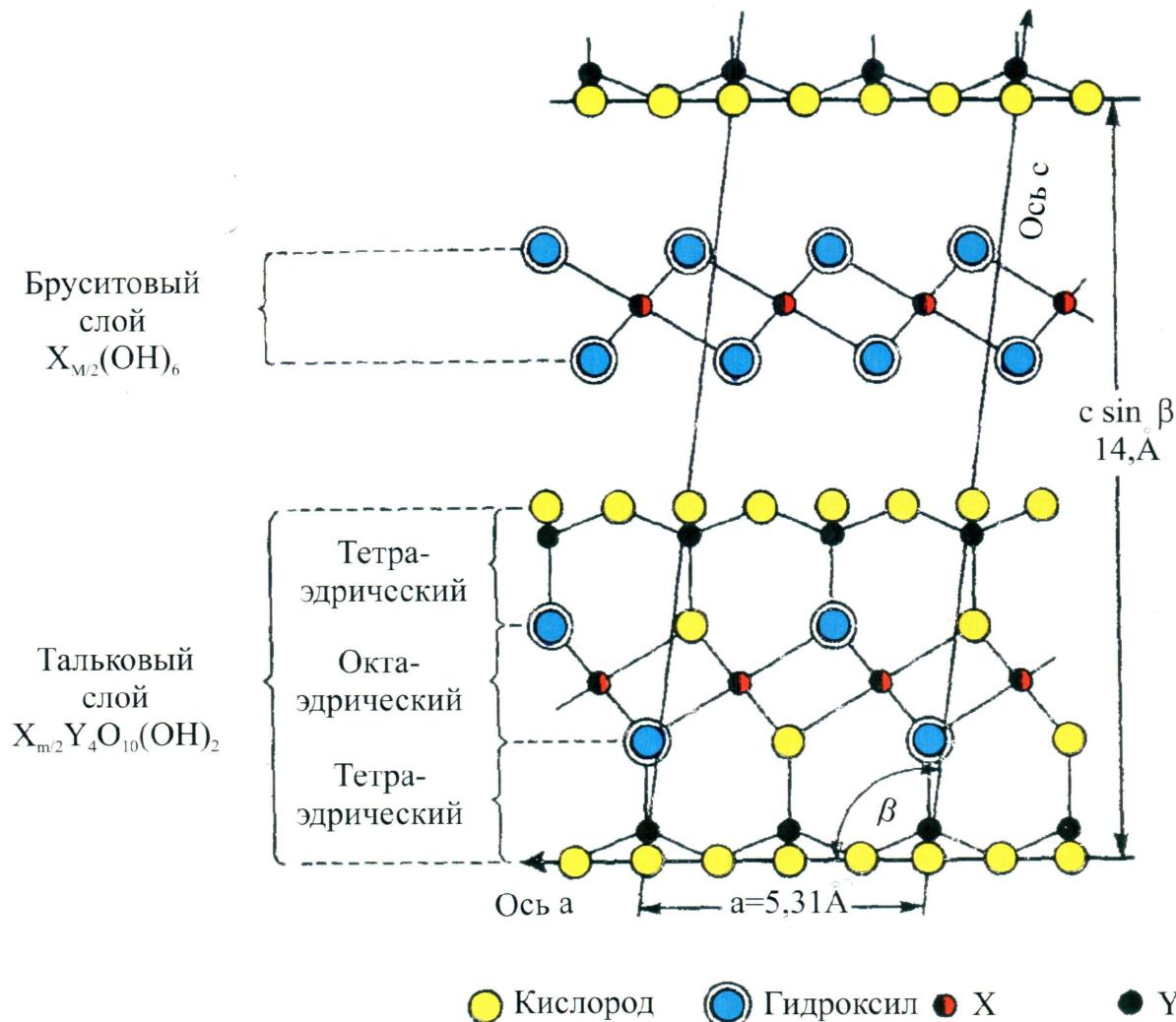


Рис. 2. Структура хлорита в проекции на (010), показывающая относительные положения тальковых и бруситовых слоев, составляющих его структуру; X - (Mg, Fe), Y - (Al, Fe) [1]

разновидностью мусковита. В ее составе уменьшается содержание межслоевого катиона K^+ , что приводит к переходу Al^{3+} из тетраэдрического слоя в октаэдрический с компенсацией валентности алюмо-кремнекислородного слоя заменой O^{2-} на OH^- или с появлением H_3O^+ вместо K^+ (см. рис. 3). Последнее превращение наиболее интенсивно протекает в кислой среде.

Таким образом, в отличие от мусковита кристаллическая структура гидрослюды из-за потери части калия вследствие гидролиза разрыхляется, между слоями появляется небольшое количество «межслоевой» воды, вместе с которой между пакетами присутствуют слабо связанные с ними ионы гидроксония, а также, вероятно, натрия. Благодаря слабой или ослабленной связи катионов с алюмо-кремнекислородными слоями они приобретают возможность перемещаться в электрическом поле, как и катионы, находящиеся в адсорбированном на поверхности гидрослюды

слое. Хотя из-за небольшой их концентрации в межслоевом пространстве и заметно более высокой силы их связи с атомами гидроксила и кислорода, входящих в состав алюмокремнекислородных пакетов, их проводимость может быть заметно ниже, чем катионов в составе адсорбированного на поверхности гидрослюды двойного слоя. Благодаря отмеченной особенности состава и строения гидрослюды, в отличие от мусковита, обладает небольшой катионообменной емкостью.

Таким образом, кроме «поверхностной» проводимости гидрослюды обладает и «внутренней» или межслоевой проводимостью, пусть даже и небольшой по величине. Однако никакой из ряда вон выдающейся электропроводностью гидрослюды не обладает. Позже при анализе распределения гидрослюды в поровом пространстве песчаников пласта ЮВ₁ Повховского месторождения по данным растровой электронной

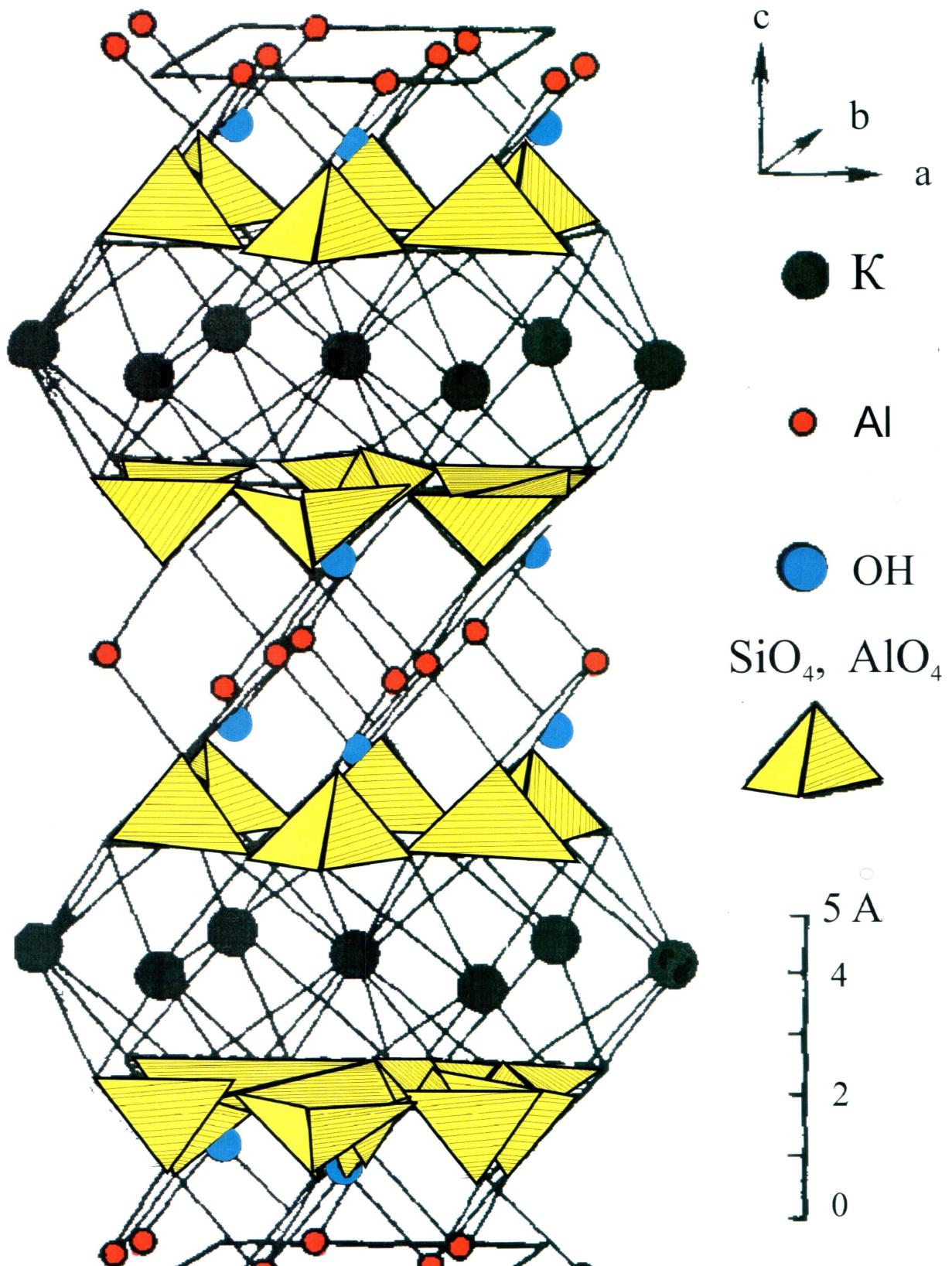


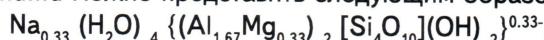
Рис. 3. Шариково-полиэдрическая модель структуры мусковита [3]

микроскопии (РЭМ) мы еще раз вернемся к этому вопросу.

Смешанослойные образования (ССО)

Смешанослойные образования представляют собой слоистые минералы, состоящие из чередующихся слоев различного состава (обычно двух близких по кристаллической структуре типов глинистых минералов). В осадочных отложениях ЗСНГБ наиболее известны ССО, состоящие из чередующихся слоев гидрослюды и монтмориллонита.

Кристаллическую структуру гидрослюды мы кратко рассмотрели выше, поэтому сейчас дадим общие представления о таковой монтмориллонита. В упрощенном виде формулу монтмориллонита можно представить следующим образом:



Судя по формуле монтмориллонита и особенностям его кристаллической структуры [1, 3], состоящей из чередующихся пирофиллитовых пакетов, в которых часть октаэдрических атомов Al^{3+} замещена на Mg^{2+} , из-за чего появился небольшой (всего около 0.33⁻) отрицательный заряд на их поверхности, который компенсируется присутствием в межпакетном пространстве слабо связанного с поверхностью слоев обменного комплекса катионов и межслоевой воды (левая часть приведенной выше формулы).

В известном смысле монтмориллонит можно представить себе как интенсивно гидролизованную гидрослюду, в которой весь межслоевой калий выщелочен и замещен на обменный катионный комплекс с межслоевой водой (рис. 4).

Благодаря наличию в структуре монтмориллонита межслоевого обменного катионного комплекса его электропроводность значительно выше, чем, например, гидрослюды, т.к. концентрация катионов в межслоевом пространстве гораздо больше, чем в поровой воде (речь идет о продуктивных отложениях ЗСНГБ), и составляет при максимальном заполнении межслоевого пространства межслоевой водой около 192 г/л. Поэтому можно предположить, что основной вклад в электропроводность монтмориллонита будет вносить не поверхностная, а межслоевая проводимость.

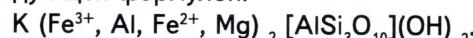
Если сделанное предположение справедливо, то ССО на основе гидрослюды и монтмориллонита будут обладать гораздо более высокой электропроводностью в насыщенной минерализованной водой породе, чем собственно гидрослюда и тем в большей степени, чем выше концентрация набухающих (монтмориллонитовых) пакетов в составе ССО. По данным рентгеноструктурного анализа (РСА) содержание набухающих пакетов в составе ССО в осадочных породах Широтного Приобья составляет в среднем 10—15, редко до 30 %.

Сделанный вывод о высокой электропроводности набухающих компонент легко проверить на примере хорошо известной низкоомной глауконитовой пачки, которая входит в состав геогиевской свиты, сопротивление которой нередко опускается до 1.8—2.2 Омм. Для этого вспомним, что представляет собой глауконитовая пачка.

Глауконитовая пачка сложена главным образом многочисленными зернами глауконита, содержание которых нередко достигает 60—80 % от объема пачки. Остальная часть породы представлена глинистыми минералами другого состава (обычно это каолинит и гидрослюда) и алевритовой, реже песчаной примесью с многочисленными микростяжениями пирита и растительного дегрита. Из-за очень высокого содержания глауконита породы этой пачки имеют характерный зеленый цвет различных оттенков.

Здесь следует сделать существенное замечание, касающееся того, что зеленый минерал, называемый глауконитом, на самом деле (по результатам РСА) представляет собой ССО, состоящие из чередующихся слоев глауконитового и монтмориллонитового (или нонtronитового) составов.

Кристаллическая структура глауконита очень похожа на таковую у мусковита [1, 3]. Однако есть и заметные отличия от состава мусковита — в глауконите в октаэдрическом слое гораздо больше железа, причем как трех-, так и двухвалентного (см. рис. 3). Кстати сказать, из-за вариаций в составе глауконита двух- и трехвалентного железа изменяется оттенок зеленого цвета у этого минерала. Приближенно химический состав глауконита может характеризоваться следующей формулой:



Из-за вариаций содержания двух- и трехвалентного железа в октаэдрических слоях, а также алюминия и кремния в тетраэдрических изменяется величина избыточного отрицательного заряда на границе между двумя пирофиллитовыми пакетами (как в мусковите или гидрослюде). В случае уменьшения величины некомпенсированного отрицательного заряда между трехслойными пирофиллитовыми пачками и соответствующим ростом содержания в октаэдрическом слое OH^- ионов снижается концентрация межслоевого калия, появляется межслоевая вода, гидроксоний, т.е. намечается переход глауконита в монтмориллонит или, вернее, в нонtronит. Таким образом, в глауконите, как и в гидрослюде, наряду с «поверхностной» проводимостью отмечается и слабая «межслоевая» проводимость.

Отметим также, что в составе глауконита присутствует двухвалентное железо, наличие которого, как мы убедились выше, обуславливает сни-

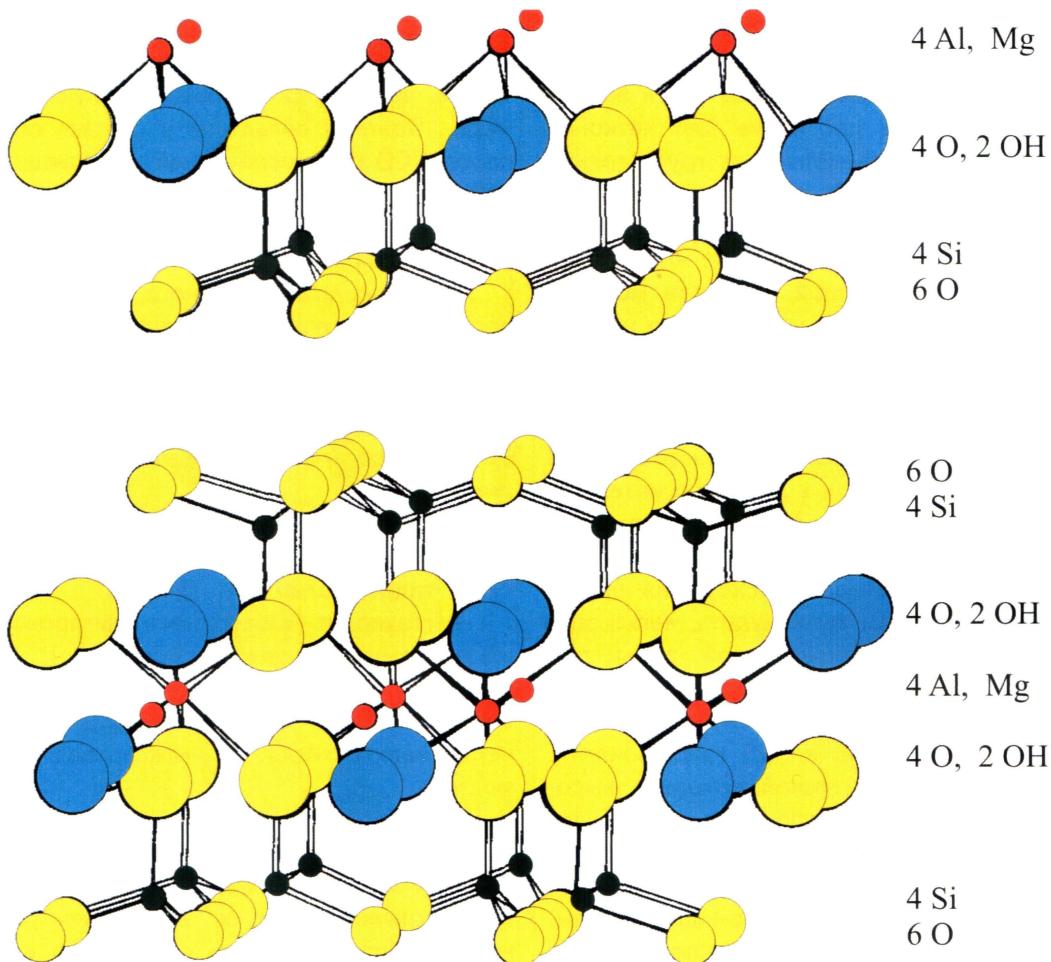


Рис. 4. Структура монтмориллонита в проекции вдоль оси *a* [1]

жение сопротивления за счет появления, вероятно, электронной проводимости.

Обратим внимание также на еще один важный факт. Если в составе обычных ССО (на основе гидрослюды и монтмориллонита), присутствующих в поровом пространстве пород-коллекторов, например, Широтного Приобья, доля набухающего компонента в их составе, как уже отмечалось выше, обычно составляет порядка 10—15 %, то в глауконитовой пачке доля монтмориллонитовых (нонтронитовых) слоев (по данным РСА) в составе ССО нередко достигает 50—60 %. Именно высоким содержанием набухающего компонента в составе ССО глауконитовой пачки и непрерывной их связью друг с другом (наряду, вероятно, с присутствием в структуре минерала Fe^{2+}) объясняется низкое УЭС этой пачки, обусловленное высокой концентрацией катионов в межслоевой воде (при мерно около 192 г/л при условии максимальной концентрации межслоевой воды). То есть в рассматриваемом случае среди всех возможных факторов, влияющих на удельное сопротивление глауконитовой пачки, именно «межслоевая» проводимость набухающих (монтморил-

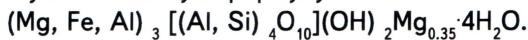
лонитовых или нонтронитовых) слоев является определяющей.

Хотя в глауконитовой пачке отмечается наличие довольно большого количества микро- и макростяжений пирита, из-за того, что они, однако, не образуют непрерывных протяженных тел, их присутствие практически не влияет на сопротивление пачки.

Если в центральных и южных районах ЗСНГБ ССО имеют гидрослюдисто-монтмориллонитовый и глауконит-нонтронитовый составы, то в северных районах, например, на широте Заполярного месторождения ССО в неокомских песчано-алевритовых отложениях представлены набухающими хлоритами (корренситами).

Корренсит представляет собой глинистый минерал с упорядоченной смешанослойной структурой, состоящей из хлоритовых и вермикулитовых слоев в соотношении 1/1. Поскольку кристаллическую структуру хлорита мы рассмотрели выше, то здесь кратко остановимся лишь на особенностях структуры вермикулита.

Вермикулит имеет следующую приближенную химическую формулу:



Положения в двойных (бруситовых) слоях полностью занимаемых в хлорите группами OH^- в вермикулите только на две трети заняты молекулами воды, а доступные для катионов положения внутри октаэдрических групп только на одну девятую заняты атомами магния [1]. Содержание атомов магния в вермикулите настолько мало, что каждый из них может быть окружен гидратной группой из шести молекул воды, причем все эти группы полностью независимы (рис. 5).

Благодаря формированию вместо бруситового слоя гидратированного слоя, включающего катионы магния и два слоя воды, вермикулты приобретают возможность к довольно интенсивному катионному обмену. Атомы магния могут замещаться на натрий, барий, калий, стронций, кальций и другие катионы. Исходя из приведенной выше формулы вермикулита, легко оценить минерализацию межслоевой воды при условии, что она полностью заполняет все межслоевое пространство. В этом случае ее минерализация будет близка к 198 г/л. Понятно, что электропроводность такой довольно высокоминерализованной межслоевой воды будет гораздо выше, чем адсорбированного (двойного) слоя и тем более обычной поровой воды, минерализация которой в среднем для неокомских пластов месторождений, расположенных в северной части ЗСНГБ, составляет 15–18, реже до 20–25 г/л.

Обратим также внимание на то, что в составе вермикулита, как и глауконита, присутствует Fe^{2+} (в октаэдрических слоях), поэтому вполне возможно также снижение сопротивления и за счет вклада внешнего электронного слоя этих атомов железа в электропроводность.

Следовательно, в том случае, если в неокомских продуктивных отложениях северных месторождений корренсит образует связанную пространственно разветвленную систему, например, в виде тонких эпигенетических пленок на поверхности обломочных зерен или микрослойков, то вполне возможно снижение удельного электрического сопротивления нефте-газонасыщенных пластов ниже принятых критических значений.

Подведем некоторые итоги проведенного анализа состава и кристаллической структуры основных типов глинистых минералов, встречающихся в осадках ЗСНГБ.

Этот анализ показал, что кроме «поверхностной» проводимости, обусловленной наличием на поверхности глинистых минералов двойного ионного слоя, в набухающих разновидностях (монтмориллонит, нонtronит, вермикулит) имеет место еще и «межслоевая» проводимость, которая из-за высокой концентрации

в межслоевом пространстве подвижных катионов (в среднем, вероятно, порядка 190 г/л) значительно превосходит «поверхностную» проводимость. Поэтому появление в составе осадочных пород ССО с высокой долей набухающих слоев приводит к резкому уменьшению их сопротивления, как, например, в глауконитовой пачке георгиевской свиты.

Исходя из вышесказанного, можно предположить, что по степени увеличения влияния на проводимость осадочных пород (при прочих равных условиях) глинистые минералы можно расположить следующим образом:

- каолинит (только «поверхностная» проводимость);
- хлорит (главным образом «поверхностная» проводимость);
- гидрослюдя;
- глауконит («поверхностная» проводимость и в небольшой степени «межслоевая»);
- ССО (за счет набухающих слоев, в которых основной вклад в снижение сопротивления вносит не «поверхностная», а «межслоевая» проводимость).

Таким образом, мы убедились, что все рассмотренные глинистые минералы в присутствии поровой минерализованной воды должны обладать отличной друг от друга электропроводностью. Поэтому трудно согласиться с утверждением М.М. Элланского, что УЭС двойного ионного слоя является постоянным и «не зависит ни от количества глинистого цемента, ни от минерологического состава глин (каолинит, иллит, бентонит, монтмориллонит)» [12]. Чтобы окончательно разобраться в этом вопросе, необходимо проведение специальных экспериментальных работ по определению электрических свойств мономинеральных образцов, представленных различными типами глинистых минералов, т.к. указанные выше значения минерализации межслоевой воды являются расчетными, полученными из химических формул набухающих глинистых минералов.

Известно, что благодаря действию капиллярных сил алевролитовые глины и сильно глинистые алевролиты из-за преобладания в структуре их порового пространства мелких пор практически повсеместно будут водонасыщенными. Поэтому их прослои и прослойки в песчано-алевритовом нефтенасыщенном коллекторе всегда будут обладать более низкими по сравнению с нефтенасыщенными песчаниками сопротивлениями, и в случае их достаточной выдержанности по простирианию они будут снижать показания удельных электрических сопротивлений нефтенасыщенных песчаников благодаря эффекту «шунтирования».

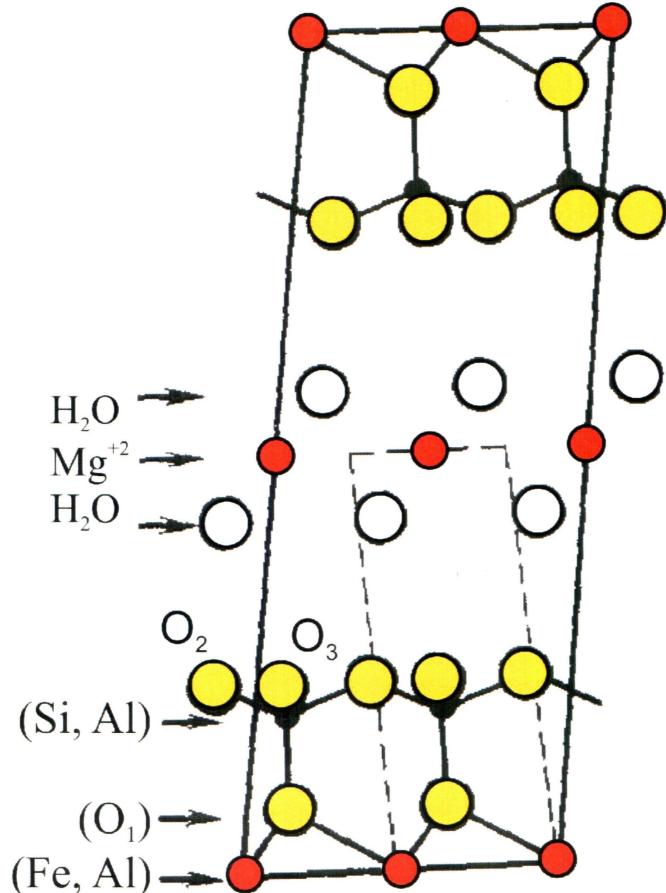


Рис. 5. Кристаллическая структура вермикулита [3]

Водонасыщенные глинистые прослои могут иметь различные размеры и толщину. Если их мощность достаточно велика и они легко выделяются электрическими методами ГИС, то в этом случае проблемы низкоомных коллекторов не возникает. Действительно, в этом случае пласти с различным сопротивлением легко выделяются в осадочном разрезе этими методами. Если же толщина токопроводящих глинистых или глинисто-алевритистых прослоев небольшая (менее 20—40 см), то в этом случае их невозможно надежно выделить по данным ГИС и вполне может появиться упомянутая выше «проблема» низкоомных коллекторов.

В следующей, второй, части этой статьи на примере конкретных продуктивных отложений Повховского месторождения мы оценим, на сколько может измениться УЭС нефтенасыщенной песчано-алевритовой породы при появлении в ее составе тонких, но достаточно протяженных водонасыщенных глинисто-алевритовых прослоев, образующих непрерывную электропроводящую сеть в теле продуктивного пласта.

ВЫВОДЫ

1. Снижение УЭС осадочных пород происходит лишь в случае присутствия в их составе непрерывных протяженных электропроводящих сетей, представленных:

— минералами (в первую очередь железосодержащими);

— минерализованными водными растворами, заполняющими их поры.

2. Из всех железосодержащих минералов, встречающихся в составе осадочных пород, лишь пирит действительно вызывает снижение их УЭС, что подтверждено лабораторными исследованиями.

3. Допускается в качестве гипотезы, что глинистые минералы, в состав которых в большом количестве входит двухвалентное железо (железистый хлорит, глауконит, нонтронит), могут иметь более низкое УЭС, чем другие глинистые минералы.

4. Двухвалентное железо, входящее в состав карбонатных минералов (например, в сидерите), вызывает резкое снижение их УЭС.

5. Токопроводящие минерализованные растворы, присутствующие в породе по типу проводимости, можно подразделить следующим образом:

— объемная или поровая проводимость «свободного» раствора, не взаимодействующего с поверхностью обломочных зерен и цемента;

— поверхностная проводимость, обусловленная возникновением на поверхности минеральных частиц двойного ионного слоя;

— межслоевая проводимость, обусловленная присутствием в набухающих глинистых минералах минерализованной межслоевой воды с довольно высокой концентрацией катионов.

6. Глинистые минералы, присутствующие в составе осадочных пород ЗСНГБ, имеют различную поверхностную и межслоевую проводимость: минимальную поверхностную и полное отсутствие межслоевой проводи-

мости характерно для каолинита; для хлорита также главной является поверхностная проводимость; в гидрослюде, кроме поверхностной, в небольшой степени проявляется и межслоевая проводимость; в ССО наряду с поверхностной большое значение приобретает межслоевая проводимость, роль которой растет по мере увеличения в их составе набухающей компоненты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брэгг У.Л., Кларингбулл. Кристаллическая структура минералов. М.: Мир, 1967. 382 с.
2. Вендельштейн Б.Ю. О связи между параметром пористости, коэффициентом поверхностной проводимости, диффузионно-адсорбционной активностью и адсорбционными свойствами терригенных пород//Труды МИНХиГП. М.: Гостоптехиздат, 1960. Вып. 31. С. 16—30.
3. Годовиков А.А. Минералогия. М.: Недра, 1975. 520 с.
4. Зарипов О.Г., Сонич В.П. Влияние литологии пород-коллекторов на удельное электрическое сопротивление пластов//Нефтяное хозяйство. 2001. № 9. С. 18—21.
5. Зубков М.Ю. Литолого-петрофизическая характеристика отложений баженовской и абалакской свит центральной части Красноленинского свода (Западная Сибирь)//Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 12. С. 1821—1836.
6. Кузьмин Ю.А., Поздеев Ж.А., Калашникова О.В. Повышение достоверности оценки петрофизических параметров недонасыщенных нефтью коллекторов месторождений Западной Сибири//Каротажник. 2006. № 14 (141). С. 48—59.
7. Нефедова Н.И., Пих Н.А. Определение нефтегазонасыщения терригенных коллекторов. М.: Недра, 1984. 188 с.
8. Петрофизика. Справочник: В 3 кн. Кн. 1. Горные породы и полезные ископаемые/Под ред. Н.Б. Дортман. М.: Недра, 1992. 392 с.
9. Семенов А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля. Л.: Недра, 1980. 446 с.
10. Семенов В.В., Питкевич В.Т., Сокова К.И. и др. Исследование низкоомных коллекторов с использованием данных кернового материала//Геофизика. 2006. № 2. С. 42—47.
11. Чикишев А.Ю., Чикишев Ю.А., Ковалева Н.П. и др. Причина наличия низкоомных коллекторов юрских отложений Каймысовского свода//Нефтяное хозяйство. 2006. № 8. С. 42—45.
12. Элланский М.М. Петрофизические основы комплексной интерпретации данных геофизических исследований скважин (методическое пособие). М.: Герс, 2001. 230 с.