

# Производственный опыт

---

---

УДК 550.85

М. Ю. Зубков  
ООО "ЗапСибГЦ"

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ПРИЧИН НИЗКООМНОСТИ ПЛАСТА Ю<sub>1</sub> (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния на электрические сопротивления (УЭС) моделей вод различной минерализации и водонасыщенных песков присутствующих в них проводников различной длины и ориентации по направлению к линиям электрического тока. Установлено влияние на величину УЭС и рН растворов, контактирующих с образцами верхнеюрских песчаников, процессов окисления присутствующего в них пирита. Обоснована возможность снижения УЭС песчаников пласта Ю<sub>1</sub> в результате реакции окисления пирита, сопровождаемой образованием дополнительного количества ионов, включая высокоподвижный протон, оказывающий активное влияние на электропроводность поровых вод, что подтверждено экспериментами, выполненными в условиях, моделирующих пластовые.

*Ключевые слова: низкоомный коллектор, пласт Ю<sub>1</sub>, ориентация и протяженность проводников, окисление пирита, условия, моделирующие пластовые.*

### Введение

В последнее время геологи-нефтяники и геофизики вновь обратились к проблеме низкоомных коллекторов, которые, несмотря на присутствие в них подвижных углеводородов (УВ), часто имеют величину удельного электрического сопротивления (УЭС), характерную для водонасыщенных интервалов, а потому по данным геофизических исследований скважин (ГИС) характеризуются как водонасыщенные и по этой причине не испытываются. Понятно, что пропуск таких



низкоомных, но тем не менее нефтенасыщенных интервалов ведет к уменьшению суммарной добычи нефти в пределах распространения таких коллекторов и занижению величины запасов, содержащихся в них.

Существуют самые различные представления о причинах, вызывающих "низкоомные" свойства таких коллекторов, которые, несмотря на кажущееся разнообразие, в принципе сводятся к поиску в них неких компонентов, имеющих повышенную удельную электропроводность (УЭП) [1–7]. В качестве таких причин и/или компонентов, обладающих высокой УЭП, называются следующие:

- повышенная концентрация пирита [1, 4–7];
- высокое содержание глинистых минералов, обладающих большой удельной поверхностью, а следовательно, и повышенной поверхностной проводимостью (двойного ионного слоя) [1, 5, 6];
- наличие помимо поверхностной еще и внутрислойной проводимости набухающих пакетов (смешанослойные образования (ССО), глауконит, монтмориллонит) [2, 3];
- протекание интенсивных эпигенетических процессов, приводящих к разрушению неустойчивых минеральных зерен с переходом в раствор входивших в их состав катионов, увеличивающих минерализацию и поверхностную проводимость глинистых минералов [1, 4–6];
- присутствие в нефтенасыщенных песчаниках тонких (не выделяемых по данным ГИС из-за их недостаточной разрешающей способности) протяженных водонасыщенных прослоев глинисто-алевритового состава, имеющих низкие УЭС и обладающих по этой причине шунтирующими свойствами [3];
- особенности относительных фазовых проницаемостей (ОФП) и фильтрационных сопротивлений нефти и воды в породах-коллекторах с различными фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС) [3];
- наличие в водонасыщенных интервалах, содержащих, главным образом, связанную воду, трещиноватых участков, заполненных подвижной нефтью [3].

Практически все авторы, рассматривающие низкоомные коллекторы, обращают внимание на присутствие в них пирита как минерала, имеющего повышенную УЭП, и часто связывают с ним необычные электрические свойства таких коллекторов. Однако никто из этих

авторов не рассматривает возможность влияния пирита на УЭС пород-коллекторов вследствие процессов окисления его кислородом, попадающим в пласт с поверхностными (содержащими растворенный кислород) водами, входящими в состав бурового раствора, или вод, используемых с целью поддержания пластового давления (ППД).

Кроме того, следует обратить внимание на то, что в большинстве статей, посвященных "низкоомным" коллекторам, доказательства причин, вызывающих их необычные свойства, носят умозрительный характер (хотя и сопровождаются достаточно сложными математическими уравнениями, например, [5]) и не содержат надежных доказательств приводимых в них выводов, которые бы основывались на экспериментальных данных.

Поэтому в первой части настоящей статьи рассматриваются результаты простейших экспериментов по определению электрического сопротивления (ЭС) моделей воды и водонасыщенных песков, в которые помещались проводники (в виде медной проволоки с различным сечением), имевшие различные длину и ориентацию по отношению к линиям электрического тока.

Во второй части статьи рассматривается процесс окисления пирита кислородом, растворенным в воде, и его влияние на электрические свойства водного раствора, получающегося в результате этого процесса.

#### **Результаты определения ЭС в моделях воды и водонасыщенных песков с помещенными в них проводниками различной длины, сечения и ориентации по отношению к линиям электрического тока**

В этой части настоящей публикации рассмотрим степень влияния присутствия в моделях пород-коллекторов проводников, имеющих низкое ЭС. Сразу заметим, что эти эксперименты носят скорее качественный, чем количественный характер, так как они проводились с использованием простейшего оборудования без строгой фиксации таких параметров, как минерализация использовавшейся воды, температуры окружающей среды, соотношения концентраций песка и насыщающей его воды, точного (воспроизводимого) расположения проводников в водной и/или песчано-водной среде и т. п. Цель этих экспериментов – показать принципиальную возможность заметного



влияния проводников с очень низким ЭС на сопротивление водных и водно-песчаных моделей, в которые они помещались.

Для проведения экспериментов использовались лотки длиной 10 см с поперечным сечением  $1 \times 1$  см, в которые наливалась вода с различной минерализацией, а также насыпался песок, насыщенный этой водой. В качестве моделей проводников, имеющих высокую электропроводность, использовались кусочки медной проволоки, имевшей сечение от 0,2 до  $1,5 \text{ мм}^2$ . Причем применялись как сплошные (непрерывные) отрезки проволоки длиной 9 см (то есть имевшие длину меньше линейных размеров модели всего на 1 см), так и отдельные ее фрагменты длиной по 1 см каждый в количестве 8 штук. Кусочки проволоки распределялись различными способами:

- 1) прямолинейно один за другим, с промежутками между ними в 1 мм в направлении линий электрического тока;
- 2) в шахматном порядке в виде двух параллельных рядов с промежутками между ними в 1 см;
- 3) параллельно друг другу (с интервалом в 1 см) и почти перпендикулярно по отношению к боковым стенкам лотков и соответственно продольной оси модели, а также линиям тока.

Замеры сопротивления модели проводились на концах лотков по 4-проводной схеме измерений с использованием прибора АРРА-703 по разности потенциалов между  $H \text{ pot}$  и  $L \text{ pot}$  (рис. 1).

В самых простых моделях, в которых участвовали просто вода и вода с присутствующими в ней медными проводниками, наблюдаются следующие закономерности:

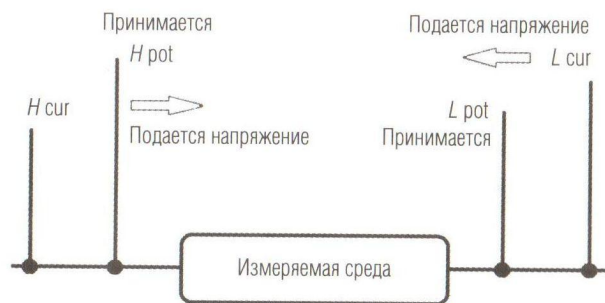


Рис. 1. Четырехпроводная схема измерения ЭС с использованием LCR-метра – АРРА-703 (замер вычисляется по разности потенциалов между  $H \text{ pot}$  и  $L \text{ pot}$ )

- помещенная в модель с пресной водой (исходное ЭС которой составляло 95 кОм) медная проволока длиной 9 см, имеющая сечение  $0,2 \text{ мм}^2$ , снижает ее ЭС примерно на 11% по сравнению с исходным (таб.);
  - при помещении в модель слабоминерализованной воды, имевшей ЭС 27 кОм, медной проволоки длиной 9 см и сечением  $1,5 \text{ мм}^2$ , произошло снижение ее ЭС на 78%;
  - в аналогичном эксперименте со среднеминерализованной водой, обладавшей первоначальным ЭС, равным 72 Ом, при помещении в нее медной проволоки такой же длины, как и в предыдущем эксперименте, но имевшей сечение всего  $0,2 \text{ мм}^2$ , ее ЭС снизилось всего на 6%;
  - при замене в модели со слабоминерализованной водой проволоки с сечением  $0,2 \text{ мм}^2$  на проволоку с такой же длиной, но с сечением  $1,5 \text{ мм}^2$ , ее ЭС снизилось на 33% по сравнению с первоначальным.
- В модели с пресной водой и с различным распределением и ориентировкой кусочков медной проволоки, имеющей сечение  $1,5 \text{ мм}^2$ , наблюдаются следующие закономерности:
- слабее всего уменьшилось ЭС при субперпендикулярной ориентации кусочков медной проволоки по отношению к длинной оси модели и соответственно к линиям электрического тока (способ 3) – всего на 1%. В заметно большей степени отмечалось снижение ЭС модели при ориентации кусочков проволоки в воде в шахматном порядке (способ 2) – на 16%. Немного ниже стало сопротивление модели при продольном расположении фрагментов проволоки (способ 1) – на 18%. Кардинально снизилось ЭС модели, когда в нее поместили сплошную проволоку длиной 9 см, – на 79%;
  - в случае с моделью слабоминерализованной воды и медной проволокой с сечением  $1,5 \text{ мм}^2$  наблюдаются схожие закономерности. Минимальное уменьшение ее ЭС отмечается при параллельном расположении кусочков проволоки по отношению друг к другу и субперпендикулярном – к оси модели (способ 3) – всего примерно на 2%. При расположении фрагментов проволоки в шахматном порядке (способ 2) отмечается снижение ЭС рассматриваемой модели на 10%. И снова самое резкое уменьшение ЭС модели отмечается при помещении в нее сплошного медного проводника длиной 9 см и сечением  $1,5 \text{ мм}^2$ . В этом случае наблюдается снижение ее ЭС почти на 67% (таб.).



Рассмотрим теперь ЭС моделей с песком, насыщенным различными типами воды и помещенными в них медными проводниками различной формы и сечения.

Модели, состоящие из песка, насыщенного водой, как и следовало ожидать, всегда имеют более высокое ЭС, чем модели, представленные только водой того же состава (табл.). Так, ЭС модели с песком и среднеминерализованной водой практически в два раза выше, чем ЭС этой же модели, но представленной только водой. То же самое можно сказать о моделях с пресной водой и состоящих из песка, насыщенного той же водой. В этом случае модель с песком имеет ЭС почти в три раза более высокое, чем та же модель, но представленная только водой (табл.).

В случае, когда в модель с водонасыщенным песком помещается сплошной (непрерывный) медный проводник, ее сопротивление заметно снижается. Так, для рассматриваемой модели с песком, насыщенным среднеминерализованной водой и сплошным проводником, имеющим сечение  $0,8 \text{ мм}^2$ , отмечается снижение ее ЭС почти на 29%.

Сопоставляя модели с водой и с песком, насыщенным той же водой, и содержащими в себе сплошные медные проводники с одним и тем же сечением, можно отметить, что ЭС первых (так же как и без медных проводников) примерно в два раза выше, чем у вторых, причем размер их сечения практически не влияет на это соотношение (табл.).

Если в модель, состоящую из песка, насыщенного водой, поместить сплошные проводники, то при замене медной проволоки с сечением  $0,2 \text{ мм}^2$  на проволоку с сечением  $0,8 \text{ мм}^2$  произойдет уменьшение ЭС модели на 9%, а если в модель поместить оба проводника, то ее ЭС уменьшится почти на 21% (табл.).

Так же как и в моделях, представленных водой различной минерализации, в моделях песков, насыщенных теми же типами вод, при помещении в них кусочков медной проволоки с различной ориентацией наблюдаются аналогичные закономерности. Так, в модели с песком, насыщенным пресной водой, минимальное уменьшение ЭС модели наблюдалось при расположении кусочков медной проволоки в шахматном порядке (способ 2). При таком расположении наблюдалось снижение ЭС модели примерно на 25% от первоначального значения. При последовательном порядке распределения кусочков медной проволоки (способ 1) наблюдается снижение ЭС на 30%, и

при помещении в модель сплошного проводника длиной 9 см того же сечения отмечается максимальное падение ЭС – на 87% (табл.).

Таким образом, проведенные простейшие эксперименты позволили на качественном уровне установить следующие закономерности:

- 1) для моделей, представленных как одной водой, так и водонасыщенными песками, при помещении в них протяженных непрерывных проводников, длина которых составляет около 90% от линейных размеров модели, отмечается снижение ЭС моделей в широком диапазоне (от 11–29 до 78–87%);
- 2) величина снижения ЭС при прочих равных условиях зависит от сечения проводника – чем оно больше, тем значительно уменьшается ЭС;
- 3) вероятно, величина изменения ЭС, кроме длины, площади сечения и способа расположения проводников, также зависит и от минерализации воды;
- 4) при одном и том же объемном содержании фрагментов проводника в моделях величина снижения ЭС модели зависит от их ориентации: минимальное уменьшение ЭС отмечается при субперпендикулярной ориентации фрагментов проводника по отношению к токовым линиям (всего на 1–2%); более значительное снижение ЭС наблюдается при шахматном порядке их распределения в модели (от 10–16 до 25%), и еще большее снижение ЭС отмечается при продольной (линейной) ориентации фрагментов проводника, расположенных на расстоянии около 1 мм друг от друга, вытянутых вдоль линий электрического тока (от 18 до 30%);
- 5) максимальное по величине снижение ЭС наблюдается в моделях, в которые помещается сплошной (непрерывный) проводник, длина которого составляет 90% от ее продольного размера; в этом случае уменьшение ЭС модели достигает 78–87%.

В заключение отметим, что при помещении в модели с водой стального прутка, имевшего диаметр 6 мм и длину 4 см, ЭС модели уменьшалось на весьма незначительную величину (менее 1%), поэтому эти результаты в таблице не приводятся. То есть присутствие в модели стального проводника, имевшего объемное содержание в модели в 8–60 раз большее, чем медные проводники, практически не оказывало заметного влияния на величину ее ЭС. Отчасти это, вероятно, объясняется и тем, что УЭС меди примерно в 6 раз меньше такового у железа.



Таблица  
 Результаты определения сопротивления различных типов вод и водонасыщенных песчаников  
 с медными проводниками и без них различного диаметра и длины

Измеряемая среда	Медная проволока (площадь) с сечением, мм <sup>2</sup>			Медная проволока с сечением 1,5 мм <sup>2</sup> , разрезанная на кусочки					Сопротивление, Ом	Разница сопротивлений с проводниками и без них, Ом	Снижение сопротивления, %	
	0,8			С продольной ориентацией (- - - - -)	С шахматной ориентацией (- . - . - . -)	Субпараллельно друг другу (     )	8					
	2	3	4				5	6				7
1												
Пресная вода	-	-	-	-	-	-	-	-	95 000	10 000	11	
Пресная вода	-	+	-	-	-	-	-	-	85 000			
Слабоминерализованная вода	-	-	-	-	-	-	-	-	27 000	21 000	78	
Слабоминерализованная вода	-	-	+	-	-	-	-	-	6000			
Среднеминерализованная вода	-	-	-	-	-	-	-	-	72	4	6	
Среднеминерализованная вода	-	+	-	-	-	-	-	-	68			
Песок, насыщенный среднеминерализованной водой	-	-	-	-	-	-	-	-	140			
Песок, насыщенный среднеминерализованной водой	+	-	-	-	-	-	-	-	100	40	29	

Продолжение табл.

Измеряемая среда	Медная проволока (площадь) с сечением, мм <sup>2</sup>			Медная проволока с сечением 1,5 мм <sup>2</sup> , разрезанная на кусочки					Сопротивление, Ом	Разница сопротивлений с проводниками и без них, Ом	Снижение сопротивления, %	
	0,8			С продольной ориентацией (- - - - -)	С шахматной ориентацией (- . - . - . -)	Субпараллельно друг другу (     )	8					
	2	3	4				5	6				7
1												
Слабоминерализованная вода	-	+	-	-	-	-	-	-	12 000	4000	33	
Слабоминерализованная вода	-	-	+	-	-	-	-	-	8000			
Песок, насыщенный слабоминерализованной водой	-	+	-	-	-	-	-	-	22 000	5000	23	
Песок, насыщенный слабоминерализованной водой	-	-	+	-	-	-	-	-	17 000			
Минерализованная вода	-	+	-	-	-	-	-	-	53	3	6	
Минерализованная вода	+	-	-	-	-	-	-	-	50			
Минерализованная вода	+	+	-	-	-	-	-	-	46	7	13	
Песок, насыщенный минерализованной водой	-	+	-	-	-	-	-	-	96			
Песок, насыщенный минерализованной водой	+	-	-	-	-	-	-	-	87	9	9	
Песок, насыщенный минерализованной водой	+	+	-	-	-	-	-	-	76	20	21	
Пресная вода	-	-	-	-	-	-	-	-	23 050	3600	16	
Пресная вода	-	-	-	-	+	-	-	-	19 450			
Пресная вода	-	-	-	+	-	-	-	-	18 850	4200	18	
Пресная вода	-	-	+	-	-	-	-	-	4850	18 200	79	
Пресная вода	-	-	-	-	-	-	+	-	22 850	200	1	
Слабоминерализованная вода	-	-	-	-	-	-	-	-	3150	300	10	
Слабоминерализованная вода	-	-	-	-	+	-	-	-	2850			



Окончание табл.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Слабоминерализованная вода	-	-	+	-	-	-	1050	2100	67
Слабоминерализованная вода	-	-	-	-	-	+	3100	50	2
Пресная вода	-	-	-	-	-	-	24 000		
Песок, насыщенный пресной водой	-	-	-	-	-	-	67 000	20 000	30
Песок, насыщенный пресной водой	-	-	-	+	-	-	47 000		
Песок, насыщенный пресной водой	-	-	-	-	+	-	50 000	17 000	25
Песок, насыщенный пресной водой	-	-	+	-	-	-	9000	58 000	87

### Изучение влияния процессов окисления пирита на электрические свойства растворов и водонасыщенных образцов

При изучении петрофизических свойств верхнеюрских продуктивных отложений (пласт Ю<sub>1</sub>) месторождений Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна обычно рассоливание образцов проводится при комнатной температуре (рис. 2, а, левая половина образца). Однако если с целью ускорения этого процесса использовать горячую воду (70 °С), то наблюдается интенсивное "побурение" рассоливаемых образцов (рис. 2, а, правая половина того же образца). Более того, побурение наблюдается и на распилах, в наиболее проницаемых прослойках внутри таких образцов (рис. 2, б). Если оставить образцы высыхать после горячего рассоливания, то на их бурой поверхности могут вырасти многочисленные ветвистые агрегаты вторичных минералов белого цвета, представленных по данным микрозондового элементного анализа (МЭА) чаще всего гипсом (рис. 2, в-д). Бурые участки по результатам того же анализа обогащены железом (рис. 2, д). Но если внимательно рассмотреть поверхность таких образцов, то кроме гипса можно заметить и другие вторичные минералы (рис. 3). Обычно вторичные "высыпания", кроме бурого цвета различных оттенков, имеют белый, желтый или охристый цвета (рис. 3, а-в). Обращает на себя внимание тот факт, что пирит, имевший первоначально соломенно-желтый цвет и металлический блеск, после горячего рассоливания становится серовато-зеленым с матовой поверхностью (рис. 3, г). Наиболее вероятно, что пленки красно-бурого цвета, образовавшиеся на поверхности образцов после их взаимодействия с горячей водой, представлены гидроокислами трехвалентного железа (гетит и/или лепидокрокит), что косвенно подтверждается результатами МЭА (рис. 2, д).

Однако чем представлены другие (помимо гипса) вторичные новообразования установить непросто, так как из-за их микроскопических количеств использовать физические или химические методы (например, рентгено-структурный анализ) невозможно, а на снимках, полученных с помощью РЭМ, трудно различить разнообразие вторичные минералы, образовавшиеся на поверхности рассматриваемых образцов, так как на этих снимках все зерна имеют однообразный серый цвет. Лишь по элементным спектрам можно попробовать на качественном уровне определить их состав.



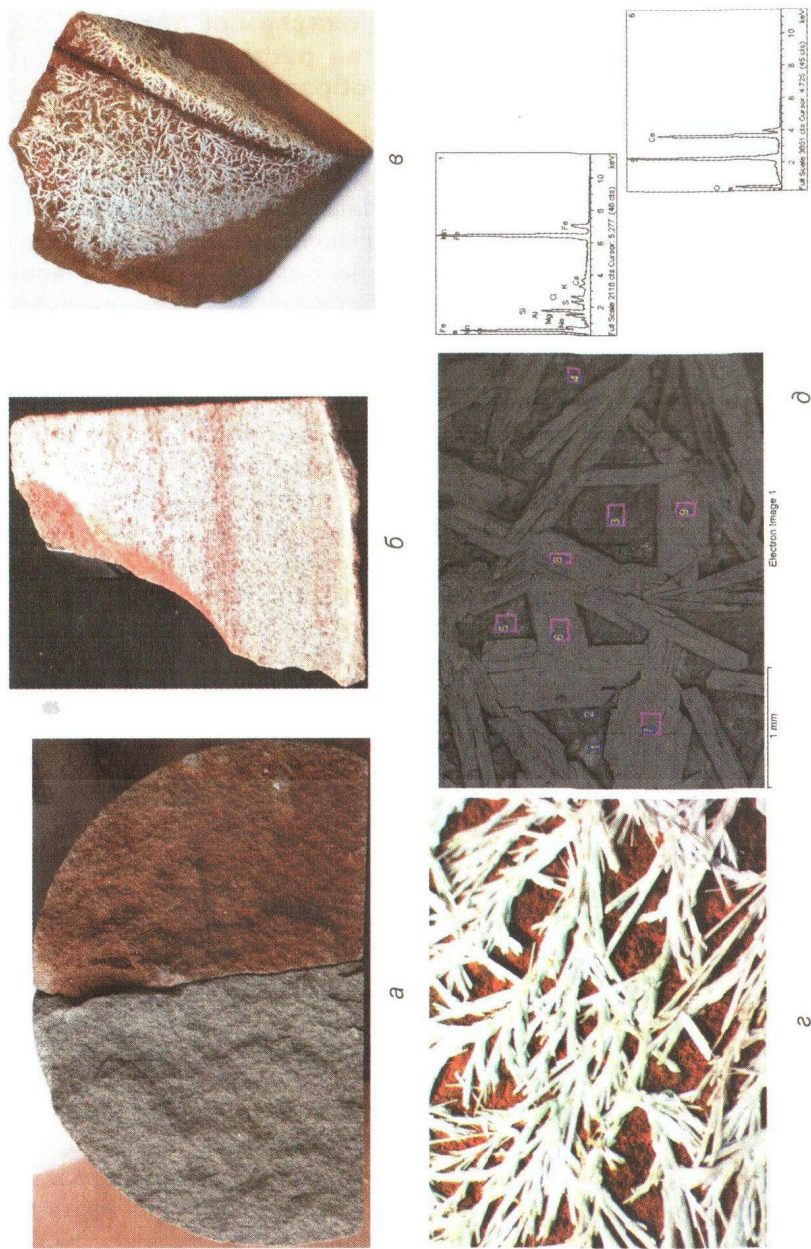


Рис. 2. Фотографии образцов (а–г) и снимок РЭМ с элементными спектрами (д) после взаимодействия этих образцов с горячей водой (пояснения в тексте)

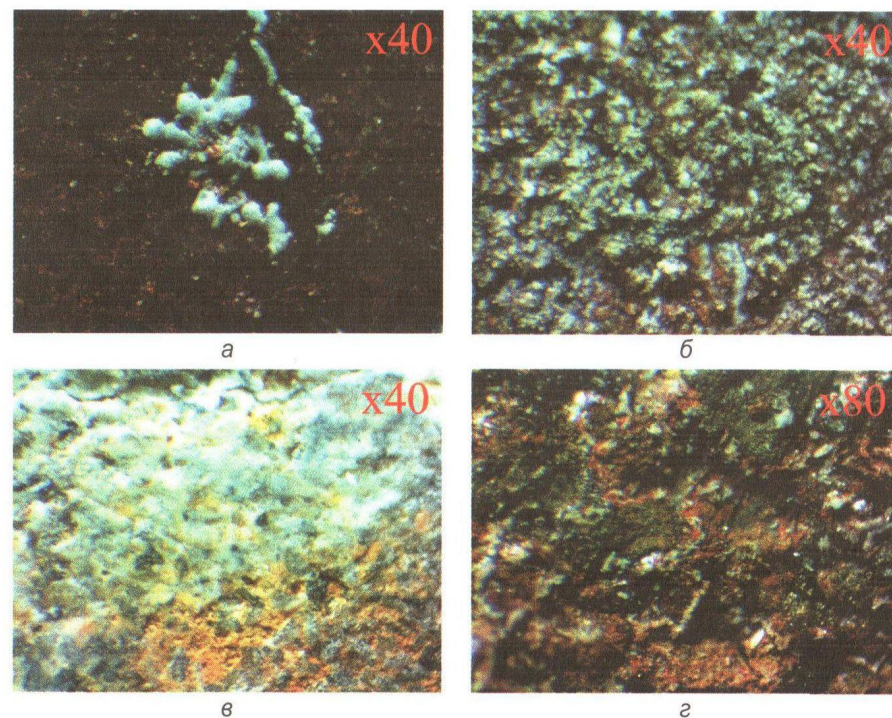


Рис. 3. Фотографии поверхности образцов после их взаимодействия с горячей водой

В качестве примеров рассмотрим снимки поверхности двух образцов, сделанных с помощью обычного оптического и электронного (РЭМ) микроскопов (рис. 4). Так, на поверхности первого образца, покрытого местами полупрозрачной пленкой белого цвета, наряду с обломочными зернами и глинистыми минералами, представленными, главным образом, кварцем, альбитом, гидрослюдой и каолинитом, присутствуют явно вторичные минеральные фазы – гипс (элементные спектры 1, 5, 8) и, вероятно, гиббсит (элементный спектр 8), не считая небольшого количества гидроокислов железа (рис. 4, а, б).

На поверхности второго образца (рис. 4, в, г), наряду с обломочными зернами и глинистым цементом, по результатам элементного анализа можно предположить присутствие, кроме гипса, большого







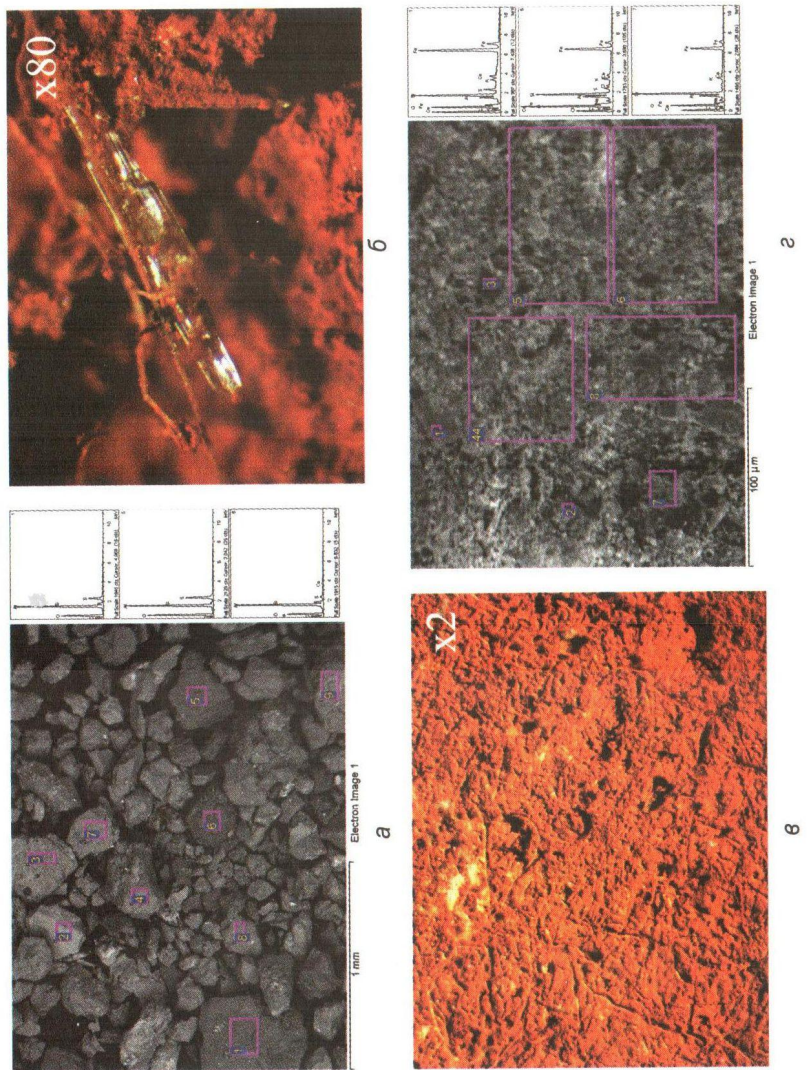


Рис. 5. Фотографии РЭМ с элементными спектрами (а, г) и поверхности фильтров (б, в) после фильтрования (пояснения в тексте) через них растворов, образовавшихся вследствие горячего рассоливания образцов

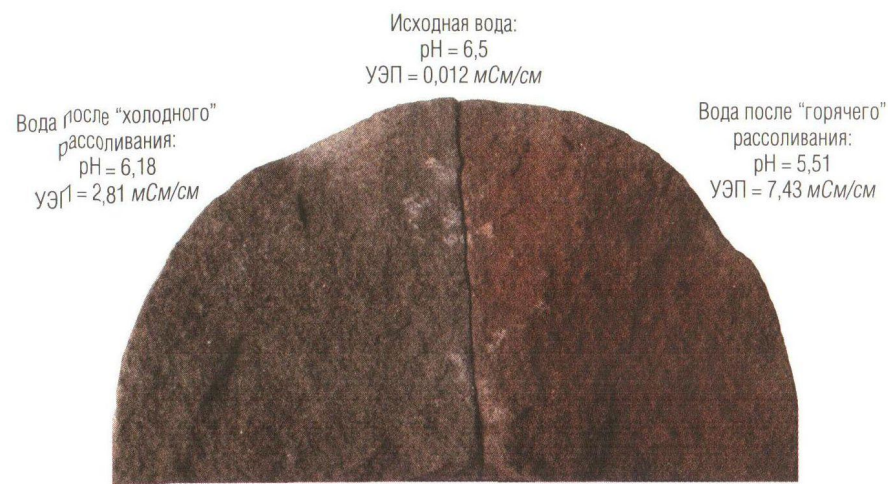


Рис. 6. Фотография образца, левая половина которого помещалась в дистиллированную воду и выдерживалась при комнатной температуре, а правая – при температуре 70 °С; рядом с фотографией приведены значения рН и УЭП растворов до и после окончания экспериментов

После окончания экспериментов измерялись УЭП и рН полученных растворов. Оказалось, что растворы, образовавшиеся в результате “холодного” (при комнатной температуре) и “горячего” (при 70 °С) рассоливания образцов стали более кислыми, а их УЭП выросла соответственно в 234 и 619 раз по сравнению с исходной дистиллированной водой (рис. 6). Причем в случае “горячего” рассоливания изменения рН, и УЭП гораздо более значительные, чем в случае “холодного”.

В прозрачных петрографических шлифах, изготовленных из образцов, подвергнутых “горячему” рассоливанию, хорошо видно, что на поверхности зерен пирита вокруг них образовались пленки (каемки) бурых продуктов его окисления, и кроме того, сформировались протяженные бурые “тяжи”, состоящие из этих продуктов, заполнивших, вероятно, наиболее проницаемые участки в образце, из которого изготовлен шлиф (рис. 7). В шлифе хорошо видно, что зерна пирита имеют различные размеры (от первых десятков микрон до 0,1–0,5 мм и более) и хаотично рассеяны по площади шлифа, не образуя непрерывных слоев.



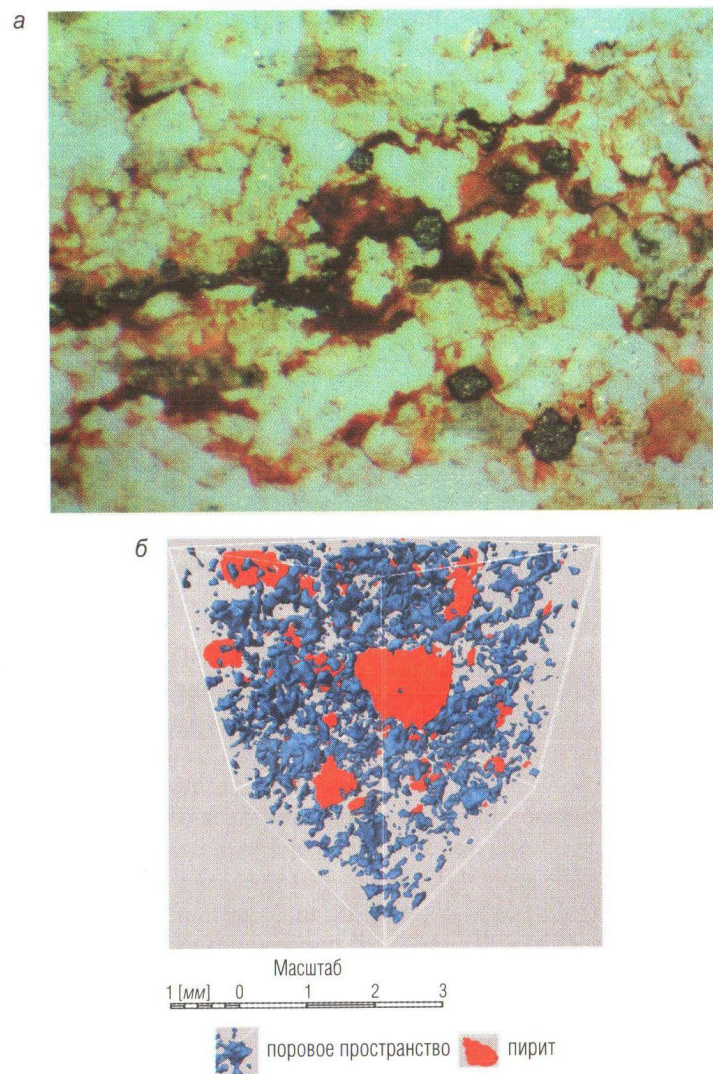


Рис. 7. Фотография прозрачного петрографического шлифа с микростяжениями пирита, окруженными пленками и протяженными "тяжами" гидроокислов железа (а), и 3D рентгеновская томография участка образца, демонстрирующая распределение пирита в его объеме (б)

Напротив, бурые "тяжи", сложенные продуктами окисления пирита, вытягиваются субпараллельно слоистости, часто выходя за пределы шлифа (рис. 7, а). Анализ результатов изучения характера распределения зерен пирита в объеме образцов с помощью рентгеновской микротомографии показал, что, действительно, зерна пирита "плавают" в этом объеме, не создавая непрерывных проводящих тел (рис. 7, б).

Эксперименты при комнатной температуре с образцами, помещенными в дистиллированную воду (объем воды примерно в 4 раза больше объема образцов) показали, что изменение рН растворов со временем изменяется различным образом. Часть растворов характеризуется увеличением величины рН со временем, а для других, наоборот, отмечается уменьшение значений рН (рис. 8, а, б). Те образцы, у которых раствор становился со временем более щелочным по сравнению с исходной дистиллированной водой, получили название "щелочных", а те из них, у которых контактировавший с ними раствор со временем приобретал более кислые свойства, были названы "кислыми".

Анализ вещественного состава образцов, отобранных из обеих групп, показал, что в "щелочных" образцах обязательно присутствуют карбонаты (обычно представленные кальцитовым цементом контактного, реже порового типов) и для них характерна очень низкая концентрация пирита (не более 1–2%). В составе "кислых" образцов, напротив, карбонаты практически полностью отсутствуют, а содержание пирита достигает 3–5% и более. Наиболее интенсивные изменения значений рН наблюдаются в течение первых суток, а затем они постепенно стабилизируются и практически не изменяются со временем (рис. 8, а, б). Причем для большинства "щелочных" образцов характерно первоначальное резкое повышение рН контактирующего с ним раствора, а затем некоторое уменьшение его величины и последующая стабилизация значений рН. Для растворов "кислых" образцов сначала наблюдается резкое уменьшение величины рН, затем более плавное, потом также наступает стабилизация значений рассматриваемого параметра (рис. 8, а, б). Если для "щелочных" образцов отмечается увеличение рН их растворов на 1,3–1,5 единиц, то для "кислых" рН уменьшается на 1,5–2,5 единиц.

Если проводить подобные кинетические эксперименты при температуре 80 °С (что примерно соответствует значениям пластовой



температуры для рассматриваемых верхнеюрских отложений), также замеряя изменения значений в зависимости от времени не только рН, но и УЭП, то получим зависимости этих параметров, подобные изображенным на рис. 8, в, г.

В отличие от кривых, полученных при комнатной температуре, у "щелочных" образцов сразу наблюдается довольно резкое уменьшение значений рН (от 8,2 до 7,95), затем более плавное – до 7,9. Одновременно с этим сначала также отмечается быстрое увеличение УЭП (от 90 до 100 мСм/см), затем более плавный рост и стабилизация на уровне 115 мСм/см (рис. 8, в). Для "кислых" образцов наблюдается схожее поведение кривых рН и УЭП в зависимости от продолжительности экспериментов. Наиболее значительные изменения анализируемых параметров происходят в первые 0,5–1 ч с момента начала экспериментов (рис. 8, г). Затем скорость изменения значений рН и УЭП изменяется более плавно, хотя полной стабилизации их значений не наблюдается даже через 7 часов. Для рассмотренного выше конкретного образца рН за время проведенного эксперимента изменилось от 5,9 до 5,2, а УЭП – от 79 до 103 мСм/см (рис. 8, г). В среднем для "кислых" образцов в опытах, проведенных при 80 °С, снижение значений рН составило порядка 0,74 единицы, а рост УЭП произошел на 27,5 мСм/см, для "щелочных" образцов изменения тех же параметров произошли соответственно на 0,31 единицу и на 24,1 мСм/см. Таким образом, для "кислых" образцов наблюдаются более значительные изменения со временем обоих параметров, чем для "щелочных", хотя и незначительные. Слабые изменения исследованных параметров, вероятно, обусловлены очень большим объемом воды, который, как уже отмечалось выше, в 4 раза больше объема использованных в опытах образцов и соответственно примерно в 30 раз больше объема порового пространства этих образцов. Поэтому приблизительно в такой пропорции происходило разбавление образующихся вследствие окисления пирита ионов, поступавших в поровый объем, заполненный первоначально дистиллированной водой.

Несмотря на то что полученные результаты в этих простейших опытах позволили получить некоторые немаловажные результаты, все же еще более интересным представляется моделирование наблюдаемых процессов окисления пирита и влияния этих процессов на УЭС моделей пласта Ю<sub>1</sub>, выполненное в условиях, моделирующих пластовые. С этой целью были проведены эксперименты, описанные ниже.

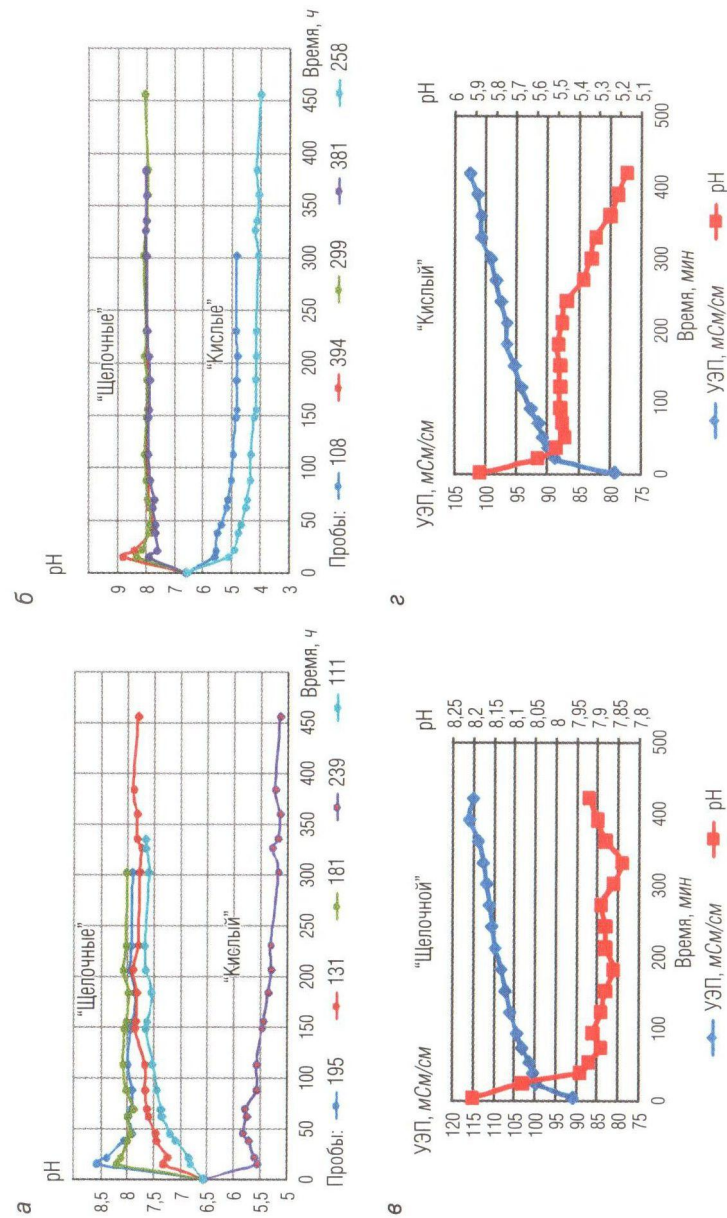


Рис. 8. Изменение величины рН раствора с пробами образцов от времени при комнатной температуре (а, б) и зависимость величины рН и электропроводности растворов с пробами образцов от времени при температуре 80 °С (в, г)



### Опыт с водонефтенасыщенным образцом и моделью пластовой воды

В этом эксперименте моделировался пласт Ю<sub>1</sub> с начальной нефтенасыщенностью. Для этого в образце создавалась остаточная водонасыщенность с использованием дегазированной пластовой воды, а потом образец донасыщался керосином, использовавшимся в качестве модели нефти. Затем осуществлялась прокачка через образец пластовой воды, насыщенной кислородом воздуха, со скоростью 15 мл/ч (рис. 9, интервал между точками 1 и 2). В точке 2 фильтрация прекращалась и модель выстаивалась в условиях, моделирующих пластовые. В течение первых 25–30 мин наблюдалось быстрое падение УЭС (примерно на 0,8 Ом·м) с последующей стабилизацией его значений (рис. 9, а). Затем вновь начиналась фильтрация насыщенной воздухом пластовой воды, но уже со скоростью 20 мл/ч (точка 3), в результате чего УЭС модели вновь начинало расти, сначала быстро, а затем стабилизировалось на уровне 7,2 Ом·м. После прекращения фильтрации (точка 4) вновь наблюдалось сначала довольно быстрое падение величины УЭС модели, затем более медленное и, наконец, наступала стабилизация их значений на уровне 6,7 Ом·м. После этого вновь начиналась сравнительно непродолжительная фильтрация насыщенной воздухом модели пластовой воды со скоростью 20 мл/ч (точка 5), что привело к росту УЭС примерно до 6,9 Ом·м, после чего фильтрация вновь была остановлена (точка 6) и снова наблюдалось уменьшение значений УЭС, сначала довольно быстрое, а затем более плавное, с последующей стабилизацией на уровне 6,4 Ом·м. Далее снова происходила сравнительно непродолжительная фильтрация с той же скоростью насыщенной воздухом модели пластовой воды (точка 7), что привело к росту УЭС от 6,4 до 6,8 Ом·м. Затем фильтрация была остановлена (точка 8) и значение УЭС уже практически не изменялось со временем (рис. 9).

После завершения экспериментов образец разрезался пополам, чтобы оценить характер изменений, произошедших внутри этого образца. Сравнивая внешний вид образца до и после эксперимента и его внутреннюю часть (после эксперимента), можно отметить, что рассматриваемый образец претерпел очень слабые внешние и "внутренние" изменения, что проявилось в незначительном "побурении" его внутренней части, причем наиболее заметное "побурение" отмечалось на его входном торце, в который поступала прокачиваемая вода (рис. 9, врезка с фотографией образца).

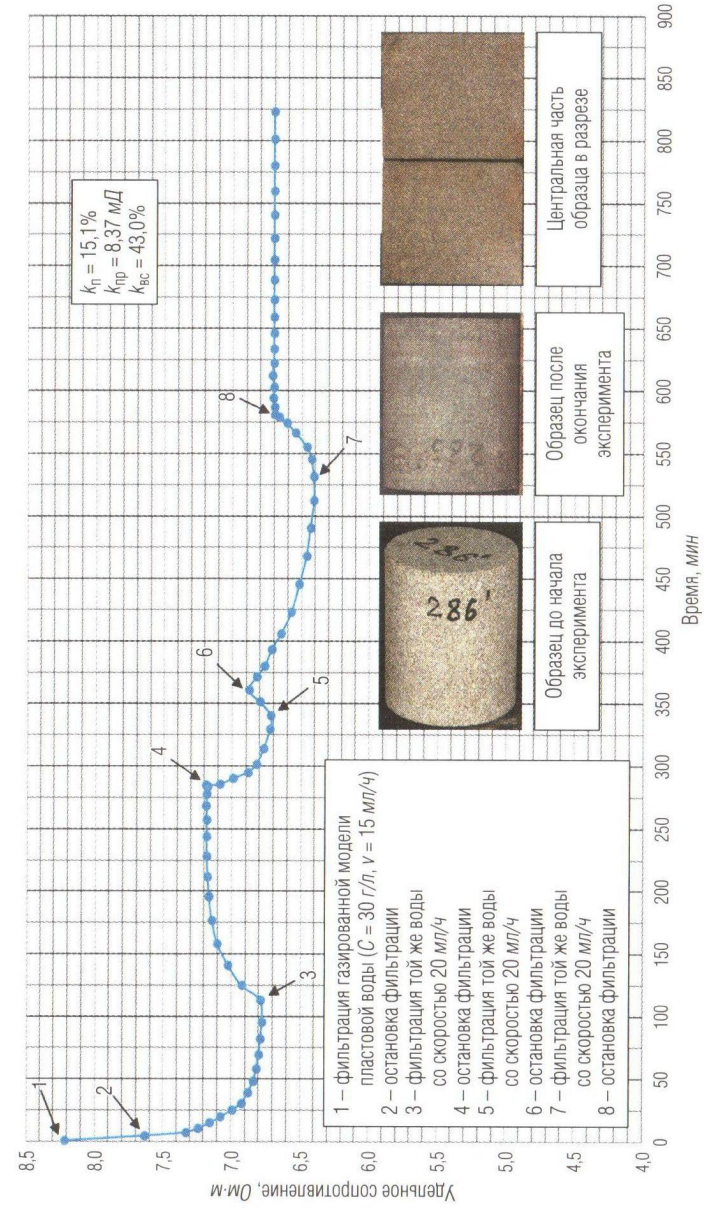


Рис. 9. Зависимость УЭС образца от времени при фильтрации через него минерализованной воды, насыщенной кислородом воздуха, в условиях, моделирующих пластовые (пояснения в тексте)



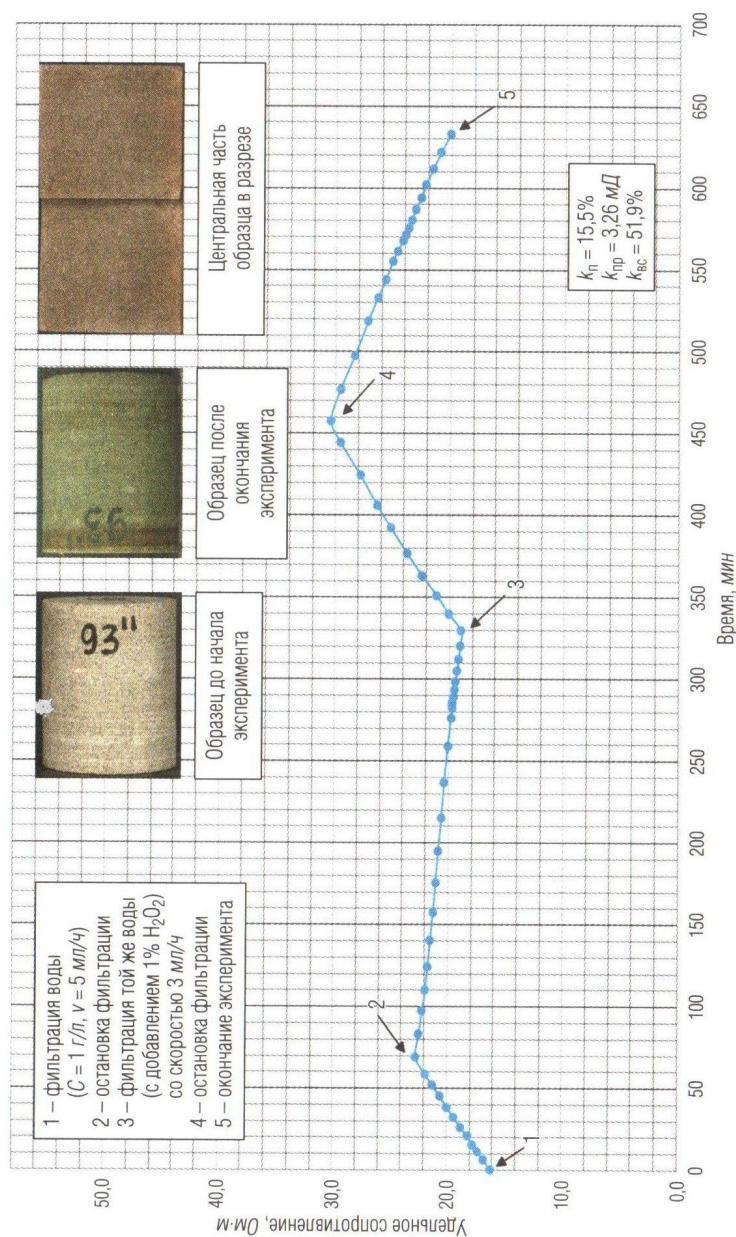


Рис. 10. Зависимость УЭС образца от времени при фильтрации через него пресной воды, насыщенной кислородом воздуха, затем пресной воды, содержащей 1%  $H_2O_2$ , в условиях, моделирующих пластовые (пояснения в тексте)

### Опыт с водонефтенасыщенным образцом и пресной водой, в том числе содержащей 1% перекиси водорода

В этом опыте использовался образец, содержащий остаточную (дегазированную) воду, донасыщенный затем керосином, моделирующим начальную нефтенасыщенность.

При фильтрации через подготовленный водонефтенасыщенный образец пресной (1 г/л), насыщенной воздухом воды со скоростью 5 мл/ч, наблюдался рост ее УЭС от 18 (точка 1) до почти 22 Ом·м (рис. 10). После остановки фильтрации (точка 2) отмечалось постепенное уменьшение УЭС образца примерно до 19 Ом·м (точка 3). Следующая фильтрация осуществлялась со скоростью 3 мл/ч, причем в пресную воду была добавлена перекись кислорода, концентрация которой в воде составляла 1%. В процессе этого этапа фильтрации сопротивление образца выросло до 30 Ом·м. После этого фильтрация была остановлена (точка 4) и наблюдалось уменьшение УЭС образца до 20 Ом·м. На этом этапе, не дожидаясь стабилизации, эксперимент был прекращен (точка 5).

Анализ внешнего вида образца до и после проведения эксперимента, а также его внутренней части показал, что в этом случае после эксперимента наблюдалось более интенсивное, чем в первом опыте, "побурение" образца, особенно на его входе, то есть на торце, через который в него поступала фильтруемая пресная вода, насыщенная кислородом (рис. 10, врезка с фотографиями).

### Опыт с водонефтенасыщенным образцом и пресной водой, в том числе содержащей 1 и 2% перекиси водорода

В этом эксперименте, как и в предыдущем, использовался образец, содержащий дегазированную модель остаточной воды, донасыщенный керосином, моделирующим его начальную нефтенасыщенность (рис. 11).

Первоначально через подготовленный образец в течение 15 ч прокачивалась пресная вода с минерализацией 1 г/л со скоростью 7 мл/ч (точка 1). В результате этого УЭС образца увеличилось с 30 до почти 50 Ом·м (в момент остановки фильтрации – точка 2). После остановки фильтрации началось плавное уменьшение УЭС до 39 Ом·м (точка 3). Затем вновь началась кратковременная (продолжительностью несколько минут) фильтрация пресной воды, но в ней уже присутствовала перекись водорода с концентрацией 1%.



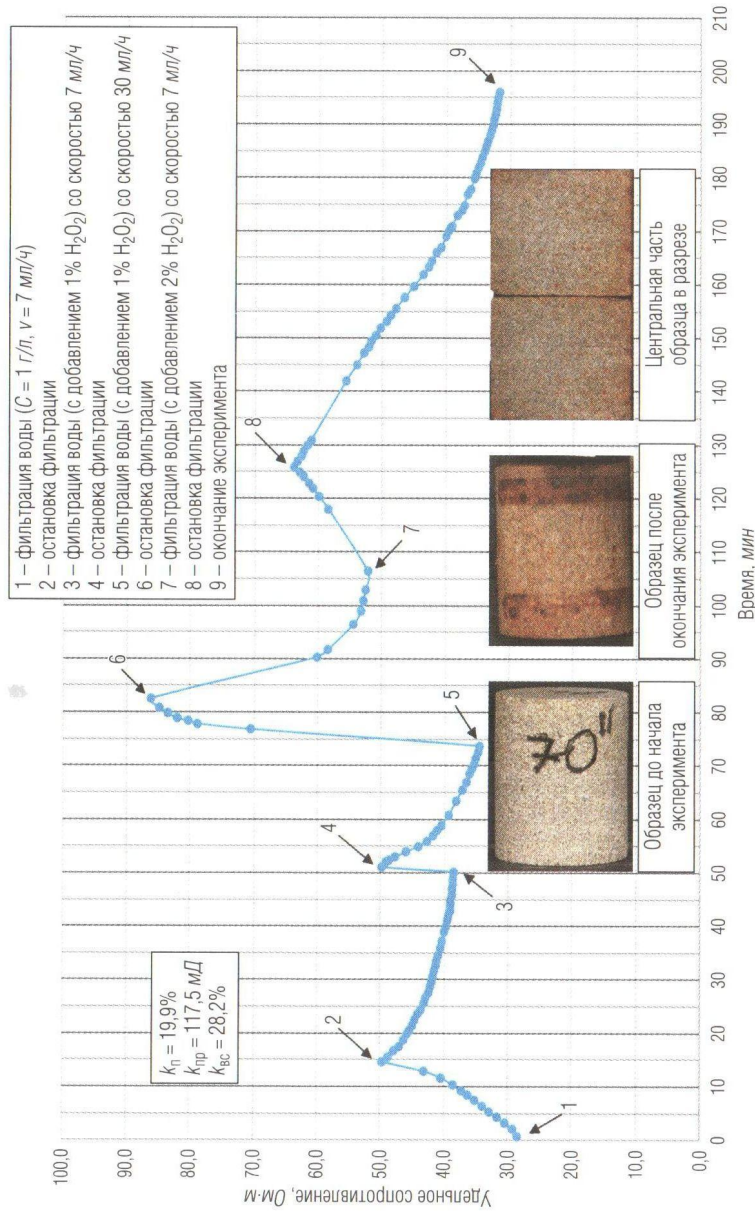


Рис. 11. Зависимость УЭС образца от времени при фильтрации через него пресной воды, насыщенной кислородом воздуха, затем пресной воды, содержащей 1 и 2%  $H_2O_2$ , в условиях, моделирующих пластовые вые (пояснения в тексте)

После остановки фильтрации УЭС образца составляло 50 Ом·м (точка 4) и наблюдался спад УЭС до 35 Ом·м (точка 5), затем вновь была включена кратковременная (продолжительностью около 10 мин) фильтрация, но уже со скоростью 30 мл/ч. В момент остановки фильтрации УЭС образца составляло порядка 85 Ом·м (точка 6). После остановки фильтрации наблюдалось сначала резкое, затем более плавное уменьшение УЭС образца до 52 Ом·м (точка 7). Затем осуществлялась фильтрация пресной воды с концентрацией  $H_2O_2$ , равной 2% (точка 7). В процессе фильтрации этого раствора УЭС образца увеличилось до 63 Ом·м в момент ее остановки (точка 8). В процессе довольно продолжительной остановки, продолжавшейся почти три часа, УЭС образца снизилось до 32 Ом·м (точка 9). Следует отметить, что на всех этапах остановок фильтрации стабилизации значений УЭС не достигалось, то есть физико-химические процессы, происходившие в модели на разных стадиях, не были окончательно завершены, так как для этого требовались значительные затраты времени.

Сравнение внешнего вида образца до и после эксперимента, а также анализ его внутренней части показали, что произошло интенсивное "побурение" как его поверхности, так и его внутренней части (рис. 11, врезка с фотографиями).

Если судить по интенсивности внешних и "внутренних" изменений образцов, отобранных из пласта Ю<sub>1</sub>, в рассмотренных выше экспериментах, то можно отметить, что степень этих изменений увеличивается при переходе от насыщенной кислородом воздуха модели пластовой воды через пресную воду, в том числе содержащую 1% перекиси водорода, к пресной воде, содержащей сначала 1%, а затем 2% перекиси водорода.

### Обсуждение полученных результатов

Эксперименты с проводниками, имеющими различные длину, размеры и объемное содержание в моделях, представленных водой с различной минерализацией и песками, насыщенными этими водами, показали, что для того чтобы произошло существенное изменение УЭП, необходимо, чтобы эти проводники были по возможности непрерывными, максимально протяженными, имели достаточно большое сечение, и если они характеризуются прерывистым распределением в объеме модели, то нужно, чтобы проводники были ориентированы

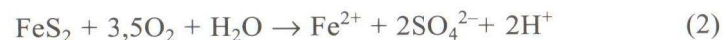


длинной осью параллельно линиям тока. В случае даже достаточно крупных, но единичных включений, помещенных в рассматриваемые модели, значимого изменения УЭП этих моделей не наблюдается (опыт со стальным прутком).

Поскольку самой высокой величиной УЭП в рассматриваемых отложениях обладает пирит, то можно бы было ожидать, что именно он оказывает наиболее значимое влияние на УЭС верхнеюрских песчаников. Однако анализ характера его распределения в объеме рассматриваемых песчаников свидетельствует о том, что он не образует протяженных токопроводящих тел, а хаотично рассеян в песчаниках в виде мелких и более крупных зерен и стяжений (рис. 7, б). Поэтому ожидать заметного влияния пирита на электрические свойства этих отложений не приходится. В то же самое время, в тех случаях, когда наблюдается его окисление, образуются дополнительные ионы, увеличивающие УЭП порового раствора, а при его окислении с образованием гидроокислов железа наблюдается образование протяженных тяжей, окрашенных в бурый цвет, свидетельствующих о заполнении ими наиболее проницаемых участков в песчаниках и повышающих УЭП пород в этом направлении (рис. 2, б; 7, а).

Рассмотрим процессы, связанные с окислением пирита более подробно. Выше уже приводилось обобщенное уравнение реакции окисления пирита (1). Специалисты, знакомые в общих чертах с химической кинетикой, сразу же скажут, что протекание такой реакции одноактно в принципе невозможно, так как для этого необходимо одновременное столкновение 14 (!) молекул, участвующих в этой реакции. Поэтому такая реакция протекает через многочисленные последовательные и параллельные реакции, и в зависимости от того, какие из них будут преобладающими и протекающими с максимальной скоростью, продукты данной реакции и будут образовываться в первую очередь.

Поскольку содержание воды всегда во много раз больше, чем свободного кислорода, то лимитирующей стадией протекания процесса окисления пирита будет количество кислорода и скорость его переноса к поверхности зерен пирита. Проведем расчет из условия растворимости кислорода в воде 10 мг/л и определим количество образующихся ионов в соответствии с реакцией

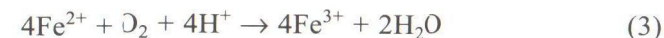


В расчете на 1 л раствора расходуется всего 0,011 мг пирита, при этом образуется  $\text{Fe}^{2+} - 0,005 \text{ мг}$ ;  $\text{SO}_4^{2-} - 0,017 \text{ мг}$ ;  $\text{H}^+ - 0,0002 \text{ мг}$ . То есть величина рН поровой воды в результате протекания этой реакции, если первоначально ее рН было нейтральным, становится равным чуть менее 4.

Таким образом, если буровой раствор проникает в пласт "одноактно", то мы имеем очень слабое увеличение его минерализации – в сумме всего на 0,0222 мг/л. Тем не менее ионная проводимость образующегося раствора заметно увеличивается. Этот феномен объясняется тем, что образующиеся вследствие протекания этой реакции ионы водорода (протоны  $\text{H}^+$ ) обладают самой высокой среди всех существующих в природе ионов проводимостью, которая превышает проводимость остальных ионов в 5–8 раз. Поэтому УЭП кислот при такой же концентрации, как у других растворимых в воде солей, например хлористого натрия, в разы выше (рис. 12).

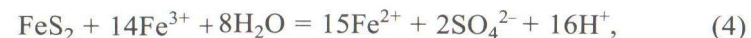
Столь высокая подвижность или проводимость протона обусловлена его чрезвычайно малыми размерами и высокой химической активностью. Из-за последнего свойства он не может перемещаться в растворе под действием электрического поля самостоятельно, а кратковременно входит в состав ионов гидроксония ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ), последовательно "перескакивая" от одной молекулы воды к другой. Такой механизм электропроводности получил название "эстафетного".

При высоком содержании кислорода в воде, реагирующей с пиритом, например, в открытой системе в экспериментах с образцами, погруженными в воду при температуре 80 °С (при свободном доступе кислорода из воздуха), возможно протекание реакции



Следовательно, в этом случае происходит образование трехвалентного железа, сопровождаемое удалением из раствора протона, то есть происходит рост рН раствора или, что то же самое, снижение скорости роста его кислотности. Однако по мере накопления иона  $\text{Fe}^{2+}$  (в соответствии с уравнением (2)), скорости обеих реакций становятся примерно одинаковыми и начинается выделение гидроокиси железа бурого цвета, что и наблюдалось в описанных выше экспериментах.

Интересно, что ионы  $\text{Fe}^{3+}$  также являются активными окислителями пирита:





что, как следует из вышеприведенного уравнения, способствует образованию дополнительного количества сульфат-ионов, а также ионов двухвалентного железа и протонов, и как следствие, должно привести к росту УЭП и pH водного раствора.

Ионные проводимости ( $\lambda$ ) при 18 °С,  $\text{см}^2/\text{Ом} \cdot \text{г-экв}$

Катионы	Проводимость	Анионы	Проводимость
$\text{H}^+$	315,0	$\text{OH}^-$	174,0
$\text{Na}^+$	42,6	$\text{Cl}^-$	66,3
$\text{K}^+$	63,7	$1/2 \text{SO}_4^{2-}$	68,6
$1/2 \text{Ca}^{2+}$	50,4	$\text{NO}_3^-$	62,6

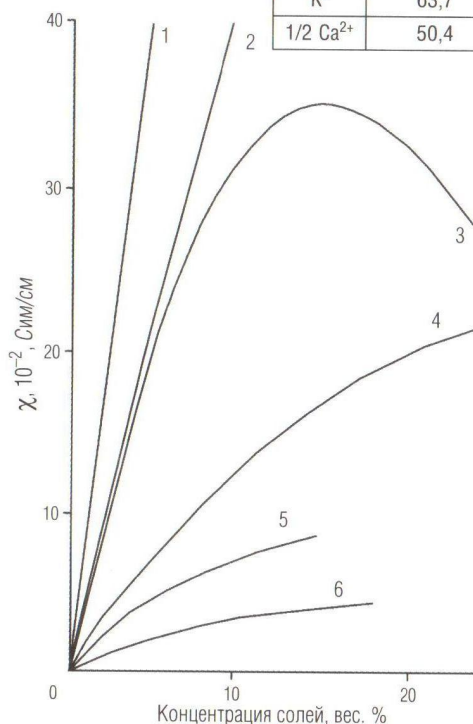


Рис. 12. Удельная электропроводность при 20 °С некоторых электролитов кислоты: 1 – соляная; 2 – серная; 3 – едкий натр; 4 – хлористый натрий; 5 – кальцинированная сода; 6 – железный купорос; во врезке помещена таблица с ионными проводимостями некоторых ионов (по И. Т. Гороновскому, 1975 и С. А. Балеzinу, 1964)

Рассматриваемые реакции с участием пирита относятся к типу топохимических, то есть протекают на его поверхности. Поэтому накапливающиеся на поверхности пирита продукты реакции и в первую очередь его гидроокислы (гётит, лепидокрокит) постепенно уменьшают площадь реакционноспособной поверхности вследствие формирования плотной оболочки (рис. 7, а). Двухвалентное железо, находившееся в растворе, вследствие его окисления кислородом из воздуха также превратилось в гидроокислы и выделилось в виде очень тонкой взвеси, которая впоследствии осела на поверхность обломочных зерен и в большей степени на глинистые минералы, обладающие гораздо большей, чем обломочные зерна, удельной поверхностью (рис. 2, а, б; 3, а, б, в; 4; 5, б-г; 6).

Судя по обнаруженным с помощью МЭА новообразованным соединениям, можно заключить, что образующиеся при окислении пирита продукты, наиболее важной из которых является серная кислота, активно взаимодействуют с окружающими их минералами. В первую очередь она реагирует с кальцитом, присутствующим в поровом пространстве песчаников, в результате чего образуется гипс (рис. 2, г, д; 4, б, г; 5, б, г). Именно поэтому в растворах, в которых находятся "щелочные" образцы, величина pH снижается незначительно и зачастую они сохраняют щелочные свойства (рис. 8, а-в).

В тех случаях, когда карбонаты в составе песчаников отсутствуют ("кислые" образцы), нейтрализаторами образующейся серной кислоты выступают другие минералы. Среди обломочных зерен в первую очередь это альбит и/или кислые плагиоклазы, а среди глинистых минералов – каолинит. Вследствие взаимодействия этих минералов с серной кислотой они разлагаются с образованием аморфного геля кремнезема, гиббсита ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) и сульфата алюминия (рис. 3; 4, б, в; 5, а). Именно поэтому по данным МЭА, несмотря на то что преобладающим в составе глинистых минералов песчаников, слагающих пласт Ю<sub>1</sub>, является каолинит, на их поверхности, подвергшейся воздействию серной кислоты (образовавшейся вследствие окисления пирита), преобладает более устойчивая гидрослюда (рис. 4, б, г). Вполне вероятно образование и других слабо растворимых в воде сульфатов и минералов типа алунита и ярозита, а также хорошо растворимых соединений, например сульфатов алюминия и железа, которые могут отлагаться на поверхности образцов по мере испарения воды (рис. 3, 4).

Эксперименты, проведенные в условиях, моделирующих пластовые, позволили установить, что в простейшем эксперименте, когда



в водокеросинонасыщенный песчаник, в поровой воде которого полностью отсутствует кислород, попадает вода с той же минерализацией, но насыщенная кислородом воздуха, то уже в процессе ее фильтрации через образец начинается снижение его УЭС (вследствие частичного вытеснения керосина минерализованной водой), которое продолжается и после прекращения фильтрации. Это свидетельствует о том, что наряду с процессом вытеснения керосина начинается реакция окисления пирита растворенным в воде кислородом с образованием за его счет дополнительных ионов, включая  $H^+$ , что и вызывает отмеченное выше снижение УЭС песчаника (рис. 9). Повторные процессы фильтрации вызывают рост УЭС в модели пласта Ю<sub>1</sub>, что объясняется вытеснением образовавшегося в процессе окисления пирита "минерализованного" и содержащего протоны порового раствора свежими, менее минерализованными порциями закачиваемой воды. После прекращения фильтрации в поровом пространстве образца вновь начинается окисление пирита кислородом, растворенным в новых порциях воды, и образование дополнительных количеств ионов, снижающих УЭС модели. При повторении этих процедур (фильтрация–остановка–фильтрация и т. д.) амплитуда роста и последующего уменьшения величины УЭС постепенно снижается, что свидетельствует об образовании "защитной" оболочки на зернах пирита, препятствующей реагированию растворенного в воде кислорода с пиритом. Из-за низкого содержания кислорода в минерализованной модели пластовой воды процессы окисления пирита протекают слабо, поэтому снаружи и внутри образца отмечается едва заметное "побурение" (рис. 9, а). Основная масса ионов железа, образовавшихся в процессе протекания этой реакции, имела двухвалентный заряд, поэтому интенсивного окрашивания образца в бурый цвет не произошло.

В образцах с дегазированной остаточной водой, донасыщенных керосином, моделирующим их начальную нефтенасыщенность, при фильтрации через них пресной воды, насыщенной кислородом воздуха, происходит увеличение УЭС (рис. 10, 11). Это объясняется вытеснением керосина и смешением пресной воды с исходной минерализованной, закачиваемой в образцы пресной воды. Последующее уменьшение УЭС образцов объясняется протеканием в них реакции окисления пирита, вследствие чего в воде появляются дополнительные ионы, включая высокоактивный протон. Последующая замена насыщенной кислородом воздуха пресной воды на содержащую перекись

водорода (с концентрацией 1%) и фильтрация этого раствора через образцы также ведет к росту их УЭС, что объясняется вытеснением образовавшейся вследствие окисления пирита "минерализованной" воды свежими порциями пресной. Уменьшение УЭС образцов после остановки фильтрации объясняется теми же причинами – образованием дополнительных новых ионов вследствие окисления пирита и соответственно ростом минерализации порового раствора. Те же процессы происходят при замене 1%  $H_2O_2$  на 2%. Только в этом случае после остановки фильтрации наблюдается более интенсивное падение УЭС, чем после фильтрации пресной воды с концентрацией  $H_2O_2$ , равной 1% (рис. 11). Наблюдаемое явление объясняется более интенсивным протеканием реакции окисления пирита вследствие более высокой концентрации перекиси водорода в пресной воде.

В экспериментах с пресной водой, содержащей перекись водорода, наблюдаются более интенсивные изменения внешнего облика образцов и их внутренней части, причем чем выше концентрация перекиси в пресной воде, тем интенсивнее эти изменения, выражающиеся в различной степени их "побурения". Более значительные колебания УЭС в процессе фильтрации и остановки эксперимента в последнем опыте по сравнению с предыдущим в значительной степени объясняются также гораздо более высокой проницаемостью образца (рис. 10, 11).

В целом отмечается явный рост величины, на которую снижаются значения УЭС после остановки фильтрации, при переходе от минерализованной воды, насыщенной кислородом воздуха, к пресной воде, также насыщенной кислородом воздуха, далее к пресной воде, в которой содержится 1%  $H_2O_2$ , и наконец к пресной воде, содержащей 2%  $H_2O_2$  (рис. 9–11).

### Заключение

Рассмотренные эксперименты с верхнеюрскими песчаниками, содержащими в своем составе пирит, указывают на возможность снижения их УЭС вследствие протекания реакции окисления пирита кислородом, что приводит к появлению в воде, насыщающей поровое пространство, дополнительного количества ионов, включая протон, обладающий уникально высокой УЭП.

Однако этот механизм снижения УЭС рассматриваемых отложений предполагает обязательное наличие двух условий, без соблюдения которых этот механизм не работает. Во-первых, необходима достаточно



- окисления пирита серная кислота будет быстро нейтрализована карбонатными минералами с образованием гипса или ангидрита.
6. Наиболее вероятно "появление" низкоомных пород-коллекторов в составе верхнеюрских отложений в нижней части продуктивного интервала, характеризующегося высоким содержанием глинисто-алевритовых прослоев, "шунтирующих" эти отложения, что объясняет сравнительно невысокие значения их УЭС несмотря на наличие в них прослоев песчаников, насыщенных подвижной нефтью, а появление по тем или иным причинам в составе поровых вод кислорода вызывает дополнительное снижение их УЭС вследствие окисления пирита и образования за его счет серной кислоты и других ионов, снижающих УЭС пластовой воды, и соответственно уменьшение значений УЭС ниже принятых критических.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зарипов О. Г., Сонич В. П. Влияние литологии пород-коллекторов на удельное электрическое сопротивление пластов // Нефтяное хозяйство. 2001. № 9. С. 18–21.
2. Зубков М. Ю. Кристаллографическое и литолого-петрофизическое обоснование электрических свойств минералов железа, глин и терригенных коллекторов (на примере пластов ВВ<sub>8</sub> и ЮВ<sub>1</sub> Повховского месторождения). Часть 1 // Горные ведомости. 2008. № 11 (54). С. 20–32.
3. Зубков М. Ю. Кристаллографическое и литолого-петрофизическое обоснование электрических свойств минералов железа, глин и терригенных коллекторов (на примере пластов ВВ<sub>8</sub> и ЮВ<sub>1</sub> Повховского месторождения). Часть 2 // Горные ведомости. 2008. № 12 (55). С. 30–53.
4. Кузьмин Ю. А., Поздеев Ж. А., Калашникова О. В. Повышение достоверности оценки петрофизических параметров недонасыщенных нефтью коллекторов месторождений Западной Сибири // НТВ "Каротажник". Тверь: Изд. АИС. 2006. Вып. 14 (141). С. 48–59.
5. Мельник И. А. Причины понижения электрического сопротивления в низкоомных коллекторах // Геофизические исследования. 2014. Т. 15. № 4. С. 44–53.
6. 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.
7. 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.

Рецензент доктор геол.-минер. наук, проф. Ю. И. Кузнецов