

УДК 543.311;57.014

КОЛЛОИДНО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ ЖЕЛЕЗА В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ

Л.В. Сериков, Л.Н. Шиян, Е.А. Тропина, П.А. Хряпов, Г.Г. Савельев, Г. Метревели*, М. Делай*

Томский политехнический университет

E-mail: lab024@yandex.ru

*Технологический Институт Карлсруэ, Германия

E-mail: fritz.frimmel@ebi-wasser.uni-karlsruhe

Представлены результаты по экспериментальному моделированию состава коллоидных систем, встречающихся в природных подземных водах. Установлено, что основным компонентом природной коллоидной системы является гидроксид железа. Показано, что соединения кремния и растворенные органические вещества выступают в роли поверхностно-активных веществ и препятствуют коагуляции золя. Приведены результаты по влиянию электролита CaCl_2 на коагуляционную устойчивость синтезированных модельных коллоидных растворов.

Ключевые слова:

Природные воды, коллоидные растворы соединений железа, экспериментальное моделирование, коагуляционная устойчивость.

Key words:

Natural water, colloid solution of iron compounds, experimental modulation, coagulating stability.

В последнее время все большее количество работ в области коллоидной химии направлено на решение практических задач. Это связано как с высоким уровнем изученности коллоидных систем, так и с необходимостью их использования в химической промышленности и технике, а также в сельском хозяйстве и животноводстве, например, для увеличения продуктивности, и в медицине — для создания высокоэффективных медицинских препаратов. Для получения коллоидных систем используют самые современные технологии диспергирования веществ и стабилизации коллоидных растворов. Разнообразные по типу коллоидные системы существуют в природе или образуются непреднамеренно как в промышленных, так и в естественных процессах. Это имеет место, например, при добыче и очистке природных вод, что связано с высокой устойчивостью коллоидных растворов на основе соединений железа. Природные воды США, Германии, Финляндии, России и др. содержат коллоиды соединений железа, причем установлено, что в их образовании важную роль играют еще и органические вещества гумусового типа [1, 2]. В России, где заболоченные участки занимают половину территории страны, а ионы железа присутствует практически во всех водных источниках, проблема удаления коллоидов является весьма актуальной.

На территории Западной Сибири, несмотря на обилие открытых водоемов, для питьевого водоснабжения используют, в основном, подземные воды [3, 4]. Содержание примесей в подземных водах разнообразно по качественному составу и количественному соотношению. Основными примесями, влияющими на качество подземных вод указанного региона и создающими колоссальные проблемы при водоподготовке, являются соединения железа в коллоидном состоянии. Обогащение подземных вод этими соединениями происходит вследствие выщелачивания и растворения железистых мине-

ралов и пород, запасы которых обнаружены на территории Западной Сибири [5], а наличие болот и мелких рек, содержащих органические вещества гумусового типа, вероятно, способствует образованию устойчивых коллоидных соединений железа.

Для разработки новых, более эффективных способов очистки необходимы данные о составе примесей на всех уровнях: атомном, молекулярном и фазовом, о строении молекул и коллоидных частиц и их взаимодействии с водой. Прямое определение этих характеристик в природных водах не всегда возможно и продуктивно вследствие сложности состава, что не позволяет однозначно связать их со свойствами системы. В этом плане более удачным представляется экспериментальное моделирование изучаемых систем и их сравнение с природными.

Основным параметром, с помощью которого оценивают эффективность различных методов очистки воды от коллоидных примесей, является коагуляционная устойчивость. Эта величина наиболее адекватно определяется константой скорости коагуляции — k , однако часто и успешно применяется зависящее от неё время появления осадка (время коагулирования — τ_k).

В случае бимолекулярной коагуляции начальная концентрация коллоидных частиц C_0 , время коагулирования τ_k и константа скорости коагуляции k связаны уравнением:

$$k=(1/\alpha-1)/C_0\cdot\tau_k,$$

где $\alpha=C_k/C_0$ — степень коагуляции, соответствующая концентрации частиц C_k , при которой фиксируется выпадение осадка.

Коагуляционная устойчивость гидрозолей может качественно характеризоваться также концентрацией электролита γ , при которой появляется осадок и которая называется порогом коагуляции [6, 7]. Коагуляция электролитами связана с тем, что

устойчивость гидрозолей обычно обусловлена взаимным отталкиванием заряженных коллоидных частиц. Заряд на частицах возникает вследствие различия энергии адсорбции катионов и анионов, сопровождается образованием двойного электрического слоя (ДЭС), который характеризуется ζ -потенциалом. Установлено, что ионы электролитов (Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} ...) уменьшают заряд и потенциал на частицах, и, соответственно, устойчивость коллоида за счёт нейтрализации заряда или сжатия ДЭС.

Например, с увеличением заряда иона его действие на ДЭС возрастает. При добавлении в коллоидный раствор одно-, двух- и трехзарядных ионов расчетный порог коагулирования γ должен изменяться в соотношении 1,00 : 0,016 : 0,0013 [8]. Отметим, что экспериментальные значения часто сильно отличаются от этих величин, так как устойчивость коллоидных растворов, в том числе и гидрозолей, может быть связана не только с образованием ДЭС, но и с образованием и свойствами тонких пленок (слоев растворителя и различных поверхностно-активных веществ, твердых продуктов реакций) на поверхностях частиц. При наличии нескольких примесей возможность различных взаимодействий, в том числе химических, значительно возрастает. В этих случаях, очевидно, нет прямой связи коагуляционной устойчивости с зарядами частиц и ионов в растворах.

Целью настоящей работы являлся синтез коллоидных систем на основе соединений железа, близких по составу природным, исследование коллоидно-химических свойств и установление факторов, влияющих на их коагуляционную устойчивость.

Методика эксперимента

Для синтеза и аналитических исследований в работе использовали реактивы $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ марки «ч.д.а.» и дистиллированную воду. В работе использовали органические вещества, выделенные из торфяных болот Томской области, предоставленные ГНУ Сибирским НИИ сельского хозяйства и торфа СО Россельхозакадемии, г. Томск, концентрацию которых оценивали хроматографическим методом по содержанию растворенного органического углерода – DOC (Dissolved Organic Carbon) и варьировали разбавлением исходных растворов в интервале – 0,05...4,0 мг/л. Молярная масса органических веществ определена с помощью метода гель-хроматографии [2]. Используемые нами образцы содержали фракции от 200 до 20000 Да.

Содержание железа и кремния в растворе определяли с использованием плазменного оптического эмиссионного спектрометра ICP-OES фирмы Varian. Водородный показатель измеряли с помощью многофункционального аппарата WTW Miltiline P4. Распределение частиц по размерам и

значения ζ -потенциала в исследуемых модельных растворах исследовали на анализаторе Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments), который позволяет проводить измерение размеров частиц в диапазоне 0,6...6000 нм. Размер частиц, при использовании этого метода, определяется по динамическому рассеянию света (угол рассеяния 173°). Результат измерения получается в виде числового распределения частиц $\varphi(r)=dN/dr$. По максимуму этого распределения находили моду – δ_m , которую принимали за средний размер частиц, так как функции распределения были близки к нормальным логарифмическим. Возможность использования этого оборудования была представлена технологическим институтом г. Карлсруэ (Германия).

Результаты и их обсуждение

Был определен химический состав и такие показатели, как pH, Eh (окислительно-восстановительная активность воды) и цветность для вод, отобранных на территории Белоярского, Каргасокского, Стрежевского районов Томской области и северных районов Тюменской области. В табл. 1 приведены основные показатели, характерные для всех подземных вод этих регионов.

Таблица 1. Химический состав и показатели подземных вод Западно-Сибирского региона

Компоненты и показатели	Единицы измерений	Количественные показатели
pH		6,0...7,0
Eh	мВ	-40...-120
Цветность	град.	30...150
Железо общее – Fe(II) + Fe(III)	мг/л	1,0...25,0
Натрий	мг/л	7,7...25,0
Калий	мг/л	1,32...5,0
Марганец (II)	мг/л	0,03...0,75
Гидрокарбонат-ионы	мг/л	30,0...360,0
Жёсткость общая	°Ж	0,5...6,0
Перманганатная окисляемость	мгO ₂ /л	3,0...14,0
Кремний (IV)	мг/л	10,0...28,0
Аммиак и ионы аммония в сумме	мг/л	1,50...8,5
H ₂ S	мг/л	0,05...1,5
Соотношение Ca(II)/Mg(II)		1:1 или 2:1
Медь	мг/л	0,003...0,140
Цинк	мг/л	0,0015...0,050
Свинец	мг/л	0,002...0,009

Из табл. 1 видно, что подземные воды указанных регионов являются гидрокарбонатными, содержат относительно большие количества железа, кремния и органических веществ, обладают высоким восстановительным потенциалом (за счет присутствия Fe(II) и органических примесей).

Среди примесей, приведенных в таблице, можно выделить те, которые являются наиболее значимыми в формировании и образовании коллоидных

частиц. *Во-первых*, это железо, которое в подземных водах находится в виде иона Fe(II). В процессе окисления образуется малорастворимый гидроксид железа (III) в виде классического коллоида, свойства которого хорошо изучены [8, 9]. *Во-вторых* – органические вещества гумусового происхождения, концентрация которых отражена в табл. 1 в строке «перманганатная окисляемость», которые способствуют образованию стабильных железосодержащих коллоидных систем [10–12]. *В-третьих* – соединения кремния, которые также могут участвовать в образовании коллоидов как с соединениями железа, так и с органическими веществами [13]. На основании этого для создания модельного раствора и исследования коллоидно-химических свойств частиц и соединений в природных водах, были выбраны соединения железа, кремния и гумусовые органические вещества.

Синтез модельных коллоидных растворов

Для синтеза модельных растворов были выбраны комбинации компонент:

- П. 1. Соединения железа (СЖ) + растворенные органические вещества (РОВ).
- П. 2. СЖ + соединения кремния (СК).
- П. 3. СЖ+РОВ+СК.

Устойчивость синтезированных растворов оценивали по изменению оптической плотности раствора, изменению концентрации коллоидного железа в растворе, значению ζ -потенциала и размерам частиц.

Простейший модельный коллоидный раствор Fe(OH)₃, обозначенный в работе как СЖ, был приготовлен путем растворения соли FeSO₄·7H₂O в воде до концентрации 5,6 мг/л, что соответствует наиболее часто встречающейся в подземных водах для всех форм железа. Значение рН в растворах поддерживали 10,0±0,2. Выбранное значение рН обусловлено экспериментами по измерению концентрации двухвалентного железа в растворе, скоростью образования осадка и изменением окислительно-восстановительного потенциала системы. Было показано, что при этом значении рН и концентрации Fe(II) в растворе, равной 5,6 мг/л (~10⁻⁴ моль/л, произведение концентрации для Fe(OH)₂ составляет около 1,2·10⁻⁵, а ПР=8·10⁻¹⁶), образование осадка происходит при $\tau_k=30$ мин, а окислительно-восстановительный потенциал системы изменяется от –80 и до +20 мВ. Измерения проводили непосредственно после приготовления раствора. Полученные результаты показали, что размер частиц составляет более 1 мкм и значение ζ -потенциала +8 мВ. Значение ζ -потенциала, близкое к нулю, свидетельствует о возможной коагуляции частиц, образовании осадка и установлении равновесия между твердой фазой и раствором, концентрация которого соответствует произведению растворимости Fe(OH)₃ (при ПР=6,3·10⁻³⁸ концентрация Fe(III) около 6,9·10⁻¹¹ моль/л). Полу-

ченные характеристики дисперсной фазы были использованы для сравнения с модельными растворами, приготовленными по п.п. 1, 2 и 3.

Синтез модельного коллоидного раствора состава СЖ+РОВ осуществляли также при концентрации ионов железа (II) 5,6 мг/л. Концентрации РОВ, способных стабилизировать железо в коллоидном состоянии, брали в диапазоне 0,05...4,0 мг/л, соответствующем их содержанию в подземных водах. При всех взятых концентрациях образуются коллоидные растворы, более устойчивые к процессу оседания по сравнению с простейшим модельным раствором СЖ. В табл. 2 приведены значения концентраций РОВ, определенных по значению DOC, размер частиц и значения ζ -потенциала образующейся дисперсной фазы.

Таблица 2. Характеристики дисперсной фазы модельного раствора СЖ+РОВ

Концентрация ионов железа, мг/л	5,6				
	0,05	0,25	0,5	1,0	4,0
Концентрация (РОВ), мг/л					
Средний, \bar{d}_m , размер частиц дисперсной фазы, нм	99	98	91	94	99
ζ -потенциал, мВ	-29	-32	-38	-38	-42
рН	9,8	10,0	9,8	9,9	10,2

Из табл. 2 видно, что уже минимальная концентрация РОВ обеспечивает образование защитного слоя на поверхности коллоидных частиц, так как увеличение концентрации до 4 мг/л не влияет на размер частиц дисперсной фазы, который составляет в среднем 96 нм, что на порядок меньше, чем для раствора СЖ. При этом знак ζ -потенциала изменяется на отрицательный, а его значения находятся в пределах –(29...42) мВ, причем, заметна тенденция к увеличению отрицательного значения с увеличением концентрации. Возможно, это свидетельствует о значительном вкладе электростатического отталкивания в формировании устойчивого коллоида. Полученный раствор устойчив во времени, о чем свидетельствует неизменное значение концентрации ионов железа в растворе, равное 5,6 мг/л в течение 30 дней.

Таблица 3. Характеристики дисперсной фазы модельного раствора СЖ+СК

Концентрация ионов железа, мг/л	5,6			
	5,0	10,0	16,0	20,0
Концентрация ионов кремния, мг/л				
Средний, \bar{d}_m , размер частиц дисперсной фазы, нм	175	167	78	82
ζ -потенциал, мВ	-38	-45	-48	-50
рН	10,3	9,4	9,9	10,2

Синтез модельного коллоидного раствора состава СЖ+СК осуществляли, используя такую же концентрацию ионов железа (II), а концентрацию ионов кремния меняли в интервале 5...20 мг/л, что соответствовало его содержанию в подземных водах. В табл. 3 приведены характеристики диспер-

сной фазы модельного раствора СЖ+СК при различных концентрациях ионов кремния.

Образование коллоидных соединений железа в присутствии соединений кремния происходит во всем исследованном диапазоне концентраций кремния. При низких концентрациях ионов кремния происходит частичная коагуляция соединений железа, о чем можно судить по увеличению размеров частиц. Из табл. 3 видно, что при низких концентрациях ионов кремния 5,0 и 10,0 мг/л средний размер частиц дисперсной фазы значительно выше, чем при использовании РОВ и составляет около 170 нм. С увеличением концентрации ионов кремния до значений 16,0 мг/л и 20,0 мг/л размер частиц уменьшается до размеров 78 и 82 нм, что мало отличается от раствора СЖ+РОВ. При размере образующихся частиц менее 170 нм дальнейшая коагуляция не происходит, осадок не образуется в течение 30 дней и аналитически определяемая концентрация железа в растворе остается неизменной равной 5,6 мг/л. Знак ζ -потенциала, как и в случае СЖ+РОВ отрицательный, его величина слабо возрастает с увеличением концентрации ионов кремния, а средняя величина составляет -45 мВ. Это свидетельствует о значительном вкладе электростатического отталкивания в формировании устойчивого коллоида.

Для синтеза модельного раствора СЖ+РОВ+СК использовали три компонента – ионы железа (II), РОВ и силикат-ионы. Так как исследование раствора СЖ+РОВ показало, что размер частиц дисперсной фазы в модельном растворе не зависит от концентрации РОВ, то их концентрация взята постоянной равной 4 мг/л. Концентрация ионов железа, как и в других растворах, также была постоянной и составляла 5,6 мг/л. Концентрацию кремния варьировали в диапазоне 5...20 мг/л. В табл. 4 приведены характеристики синтезированного раствора СЖ+РОВ+СК.

Таблица 4. Характеристики дисперсной фазы модельного раствора СЖ+РОВ+СК

Концентрация (РОВ), мг/л	4			
Концентрация ионов железа, мг/л	5,6			
Концентрация ионов кремния, мг/л	5	10	16	20
Средний, δ_m , размер частиц дисперсной фазы, нм	114	96	83	92
ζ -потенциал, мВ	-20	-28	-32	-29
pH	10	10	10	10

Из зависимости размера частиц и величины ζ -потенциала от концентрации ионов кремния можно сделать вывод, что для образования устойчивой коллоидной системы достаточна концентрация ионов кремния несколько большая, чем 5 мг/л. Вероятно, при этом на коллоидной частице образуется сплошной монослой соединений кремния. При увеличении концентрации кремния его избыток может находиться в растворе в свободном состоянии.

Сравнение данных для 4-х модельных растворов показывает, что коллоидный раствор гидроксида железа без добавок других веществ не устойчив, так как коллоидные частицы велики, а заряд их поверхностей при $\text{pH}=10\pm 0,2$ близок к нулевому значению. В случае модельного раствора СЖ+СК анионы слабой кремниевой кислоты адсорбируются на поверхности коллоидных частиц железа за счет слабополярных связей, что приводит к перезарядке поверхности частиц до сравнительно больших отрицательных значений потенциала. Это увеличивает взаимное отталкивание частиц и, вследствие этого, уменьшаются их размеры, и увеличивается устойчивость коллоидной системы.

Аналогичный результат наблюдается и для модельного раствора СЖ+РОВ вследствие того, что РОВ являются слабыми кислотами.

В случае модельного раствора СЖ+РОВ+СК совместное действие органической и неорганической примесей качественно аналогично действию каждой из них, однако не является аддитивным – скорее эти добавки конкурируют между собой.

Влияние ионов кальция на образование и устойчивость коллоидных соединений железа в исследуемых модельных растворах

Ранее в работах [11, 12] было установлено, что устойчивые коллоиды железа, образуются в водах с низким содержанием солей жесткости. В исследованных природных водах жесткость определяется в большей степени наличием солей кальция, чем солей магния. Поэтому, в работе рассмотрено влияние ионов кальция на синтез модельных растворов, образование и устойчивость получаемых коллоидов. Значение водородного показателя поддерживали в диапазоне $10,0\pm 0,2$.

В экспериментах использовали $2,5\cdot 10^{-4}$ и $5\cdot 10^{-4}$ М растворы хлорида кальция. Выбор этих концентраций обусловлен содержанием солей жесткости в подземных водах Западной Сибири. Исследования проводили на всех модельных растворах кроме СЖ, а именно СЖ+РОВ, СЖ+СК и СЖ+РОВ+СК. После введения в модельные растворы ионов кальция изучали изменение ζ -потенциала, размеров частиц и их осаждение. Было установлено, что изменение коллоидно-химических характеристик при добавлении ионов кальция зависит от компонентного состава модельного раствора.

В табл. 5 приведены характеристики дисперсной фазы модельного раствора СЖ+РОВ после введения ионов кальция с концентрацией $5\cdot 10^{-4}$ М ($20\pm 3,5$ мг/л).

Как видно из табл. 5 введение ионов кальция приводит к образованию агрегатов с размером более 1 мкм, уменьшению отрицательного значения ζ -потенциала и образованию осадка гидроксида железа (III).

Таблица 5. Характеристики дисперсной фазы модельного раствора СЖ+РОВ при добавлении ионов кальция

Концентрация ионов железа, мг/л	5,6	
Концентрация (РОВ), мг/л	4	
Концентрация ионов кальция, мг/л	0	20
Средний, δ_m , размер частиц дисперсной фазы, нм	99	1915
ζ -потенциал, мВ	-42	-20

Для модельного раствора СЖ+СК, содержащего железо и ионы кремния в соотношении 5,6 : 5 мг/л соответственно, введение ионов кальция такой же концентрации, как и в первом случае, приводит к увеличению размеров частиц до значений более 1 мкм, уменьшению в 1,5 раза отрицательного значения ζ -потенциала и образованию осадка. Однако, при увеличении концентрации кремния до значений 20 мг/л ($7 \cdot 10^{-4}$ М) добавление ионов кальция с концентрацией 20 мг/л ($5 \cdot 10^{-4}$ М) уже не приводит к увеличению размеров частиц и образованию осадка. Результаты приведены в табл. 6.

Таблица 6. Характеристики дисперсной фазы модельного раствора СЖ+СК при добавлении ионов кальция

Концентрация ионов железа, мг/л	5,6			
Концентрация ионов кремния, мг/л	5		20	
Концентрация ионов кальция, мг/л	0	20	0	20
Средний, δ_m , размер частиц дисперсной фазы, нм	175	1200	82	92
ζ -потенциал, мВ	-38	-29	-50	-31

Эффект образования устойчивой коллоидной системы при избытке ионов кремния по отношению к ионам кальция можно связать с тем, что ионы Ca^{2+} связываются избытком ионов SiO_3^{2-} с образованием силиката кальция – $CaSiO_3$ ($PP=5,6 \cdot 10^{-9}$) и уже не действуют на ДЭС.

Для модельного раствора СЖ+РОВ+СК добавление ионов кальция той же концентрации 20 мг/л ($5 \cdot 10^{-4}$ М) оказывает меньшее влияние на формирование коллоидных частиц железа, чем для растворов СЖ+РОВ и СЖ+СК. В табл. 7 приведены значения ζ -потенциала и размер частиц в модельном растворе СЖ+РОВ+СК в присутствии ионов кальция.

Таблица 7. Характеристики дисперсной фазы модельного раствора СЖ+СК+РОВ при добавлении ионов кальция

Концентрация ионов железа, мг/л	5,6	
Концентрация (РОВ), мг/л	4	
Концентрация ионов кремний, мг/л	5,0	
Концентрация ионов кальция, мг/л	0	20
Средний, δ_m , размер частиц дисперсной фазы, нм	84	480
ζ -потенциал, мВ	-30	-30

Так, при соотношении кальций : кремний $5 \cdot 10^{-4} : 2 \cdot 10^{-4}$ М, где избыток ионов кальция, не свя-

занных с силикат-ионами составляет $3 \cdot 10^{-4}$ М, коллоидные частицы формируются до размера 480 нм, являющегося промежуточной величиной между 1200...85 нм. Это вероятно, связано с тем, что уменьшение концентрации ионов кальция в растворе приводит к меньшему сжатию ДЭС. При увеличении концентрации ионов кальция в растворе происходит формирование частиц более 1 мкм. На рисунке приведена зависимость изменения концентрации ионов железа в растворе СЖ+РОВ+СК от концентрации ионов кальция при pH $10,0 \pm 0,2$ и постоянной концентрации силикат-ионов.

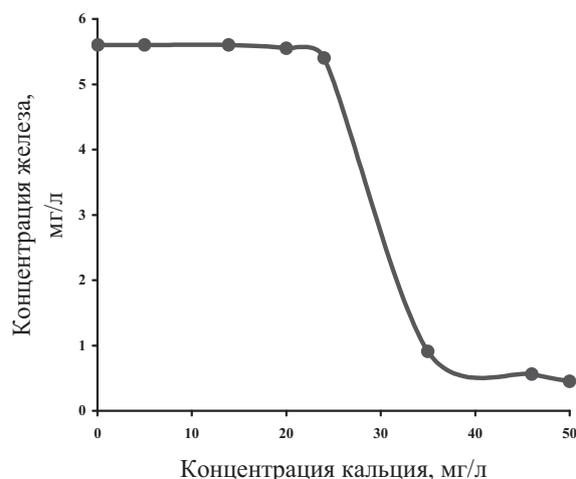


Рисунок. Зависимость концентрации ионов железа от концентрации ионов кальция в модельном растворе СЖ+РОВ+СК при pH $10,0 \pm 0,2$

Из рисунка видно, что в модельном растворе СЖ+РОВ+СК при соотношении кальций : кремний $6 \cdot 10^{-4} : 2 \cdot 10^{-4}$ М, концентрация ионов кальция в растворе, не связанных с силикат-ионами, возрастает до $4 \cdot 10^{-4}$ М, которая является достаточной для коагуляции и образования осадка.

Результаты, полученные на модельных растворах, полностью совпадают с полученными на природных подземных водах. Действительно, в природных водах, в которых соотношение кальций : кремний составляет $25 \cdot 10^{-4} : 6 \cdot 10^{-4}$ М не наблюдается образование коллоидов железа. Основой водоподготовки в таких случаях является окисление ионов железа (II), отстаивание и фильтрование. В природных водах Западной Сибири, содержащих ионы железа (II), органические вещества и кремний, при низком содержании солей жесткости, менее $25 \cdot 10^{-4}$ М образуются железосодержащие коллоиды, обладающие повышенной устойчивостью к физико-химическим воздействиям, используемым в современных технологиях очистки воды. Учитывая, что размер дисперсий в природных водах составляет около 400 нм, в безреагентных технологических процессах обработки воды следует увеличивать эффективность работы фильтрующих элементов.

Выводы

1. Методом экспериментального моделирования изучены коллоидно-химические свойства растворов, содержащих ионы железа, растворенные органические вещества и ионы кремния. Показано, что растворенные органические вещества и силикат-ионы выступают в роли поверхностно-активных веществ по отношению к золю железа, увеличивающих их устойчивость и затрудняющих очистку от примесей.
2. Показано, что влияние органических веществ (гуматов), силикат-ионов и ионов кальция объясняется в рамках электростатических представлений об образовании и устойчивости коллоидных растворов гидроксида железа.
3. Установлено, что одним из основных факторов, влияющих на формирование коллоидных ра-

створов соединений железа в природных водах и на их коагуляционную устойчивость, является наличие солей жесткости.

4. Определено, что при соотношении ионов кальция : кремния $6 \cdot 10^{-4} : 2 \cdot 10^{-4}$ формируются частицы с размером более 1 мкм, способные к коагуляции и образованию осадка.

Работа выполнена при финансовой поддержке:

1. Программы сотрудничества «Михаил Ломоносов» между Министерством образования и науки РФ и Германской службы академических обменов (грант DAAD F08728556).
2. Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России 2009–2013». Реализация мероприятия 1.2.2. «Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук» (ГК № П270 от 23.07.2009).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Salanko J.T., Lakso E.J., Kamula R.L. The effect of ozonation on the size fractions of iron and total organic carbon in groundwater // Journal of Environmental Science and Health Part A. – 2007. – № 42. – P. 795–801.
2. Perminova I.V., Frimmel F.H., Kudryavtsev A.V., Kulikova N.A., Abbt-Braun G., Hesse S., Petrosyan V.S., Molecular weight characteristics of humic substances from different environments as determined by size exclusion chromatography and their statistical evaluation // Environ. Sci. Technol. – 2003. – № 37. – P. 2477–2485.
3. Зекцер И.С., Язвин Л.С. Ресурсы подземных вод и их использование // Водные проблемы на рубеже веков. – М.: Наука, 1999. – С. 80–91.
4. О состоянии водных ресурсов Российской Федерации в 2002 году // Государственный доклад. – М.: НИИ-Природа, 2003. – 166 с.
5. Шварцев С.Л. Общая гидрогеология. – М.: Недра, 1996. – 425 с.
6. Еременко Б.В., Малышева М.Л., Самбур В.П. Устойчивость водных дисперсий микропорошков карбида титана в растворах электролитов // Коллоидный журнал. – 1989. – Т. 51. – № 1. – С. 25–35.
7. Малахова А.Н. Коллоидная химия. – М.: Высшая школа, 1987. – 480 с.
8. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. – М.: Химия, 1976. – 512 с.
9. Шелудко А. Коллоидная химия. – М.: Мир, 1984. – 320 с.
10. Serikov L.V., Tropina E.A., Shiyani L.N., Frimmel F.H., Meterveli G., Delay M. Iron oxidation in different types of groundwater of Western Siberia // Journal for Soils and Sediments. – 2009. – V. 9. – № 2. – P. 103–110.
11. Сериков Л.В., Шиян Л.Н., Тропина Е.А., Хряпов П.А. Цветность подземных вод Западно-Сибирского региона // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 3. – С. 54–58.
12. Сериков Л.В., Шиян Л.Н., Тропина Е.А., Видяйкина Н.В., Фриммел Ф.Х., Метревели Г., Коллоидные системы подземных вод Западно-Сибирского региона // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 6. – С. 27–31.
13. Иванов М. Обескремнивание воды // Аква-терм. – 2000. – № 3. – С. 12–14.

Поступила 18.03.2010 г.