

НАНОРАЗМЕРНЫЕ И НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ
МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ

УДК 541.15+541.183+543.544

РОЛЬ ПРОЦЕССОВ САМООРГАНИЗАЦИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ
НАНОЧАСТИЦ ЖЕЛЕЗА В ОБРАТНЫХ МИЦЕЛЛАХ

© 2019 г. А. А. Ревина¹, *, О. В. Суворова¹, Ю. С. Павлов¹, Д. Л. Тытик¹

¹Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН
Ленинский проспект, 31, корп. 4, Москва, 119071 Россия

*e-mail: alex_revina@mail.ru

Поступила в редакцию 03.09.2018 г.

После доработки 07.02.2019 г.

Принята к публикации 08.02.2019 г.

Изучение оптических свойств наночастиц железа, полученных методом молекулярной сборки при использовании реакций химического и радиационно-химического восстановления ионов в обратных мицеллах, рассматриваемых в качестве микрореакторов, позволило выявить особенности формирования наночастиц (НЧ) металлов на различных этапах физико-химических процессов, включая стадию самопроизвольного образования упорядоченных пространственных наноструктур в пострадиационный период. При анализе результатов измерения спектральных характеристик обратномиецеллярных растворов (ОМР), не содержащих ионов металлов, была получена важная информация об эволюционных изменениях в коллоидных системах. После введения ионов железа в ОМР по характерным спектрам оптического поглощения в зависимости от времени хранения было зарегистрировано формирование НЧ Fe за счет процессов самоорганизации (“self-assembly”, SA). На основании полученных результатов в нашей работе обсуждаются некоторые особенности процессов самоорганизации в ОМР при различных реакциях инициирования процессов восстановления ионов железа и формирования НЧ Fe.

Ключевые слова: обратные мицеллы, радиационно-химическое (химическое) восстановление, наночастицы железа, бис(2-этилгексил)сульфосукцинат натрия (АОТ), кверцетин, самоорганизация, UV-VIS спектрофотометрия, методы электронной спектроскопии

DOI: 10.1134/S0044185619040168

ВВЕДЕНИЕ

Нанотехнологии предлагают различные способы получения наночастиц металлов, оксидов, биметаллов и других наноструктур с заданными свойствами (каталитическими, магнитными, бактерицидными) для создания функциональных материалов, которые находят широкое практическое применение в технике, электронике, нанофотонике, медицине и сельском хозяйстве [1–12]. К особо перспективным металлам с каталитическими свойствами, близкими к металлам платиновой группы, имеющим большую распространенность и менее высокую стоимость, относится железо. В наших исследованиях для синтеза НЧ железа и других металлов в водноорганических ОМР используются реакции направленного химического (Chem) и радиационно-химического (RadChem) восстановления ионов [5–7]. В Chem синтезе восстановление происходит за счет природных антиоксидантов (например, флавоноида кверцетина) и молекулярного кислорода, а в RadChem – в дезаэрированном ОМР за счет короткоживущих частиц радиолитической воды с высокими вос-

становительными потенциалами: сольватированных электронов, $e_{\text{сольв}}^-$, радикалов H и R₁.

Давно считалось экспериментально установленным, что свойства воды (связанная вода) у границы раздела фаз отличаются от объемной и могут оказывать существенное влияние на поведение всего раствора [4, 14, 15]. По современным представлениям это может определяться кристаллохимическими свойствами молекул воды, формирующих в объеме сетку водородных связей [16], а на границе фаз по данным [17] – слой пограничной воды (“Exclusion Zone Water”, или “EZ-water”). В ходе исследований электропроводности, электромагнитных и спектральных свойств ОМР в [18–20] были получены результаты, подтверждающие что вода в водном пуле обратных мицелл может быть поляризованной¹. Схема обратной мицеллы состава H₂O/АОТ/изооктан представлена на рис. 1.

¹ Идея о поляризованности воды в обратных мицеллах исследуется и обсуждается уже достаточно давно. См. например [20] – ред.

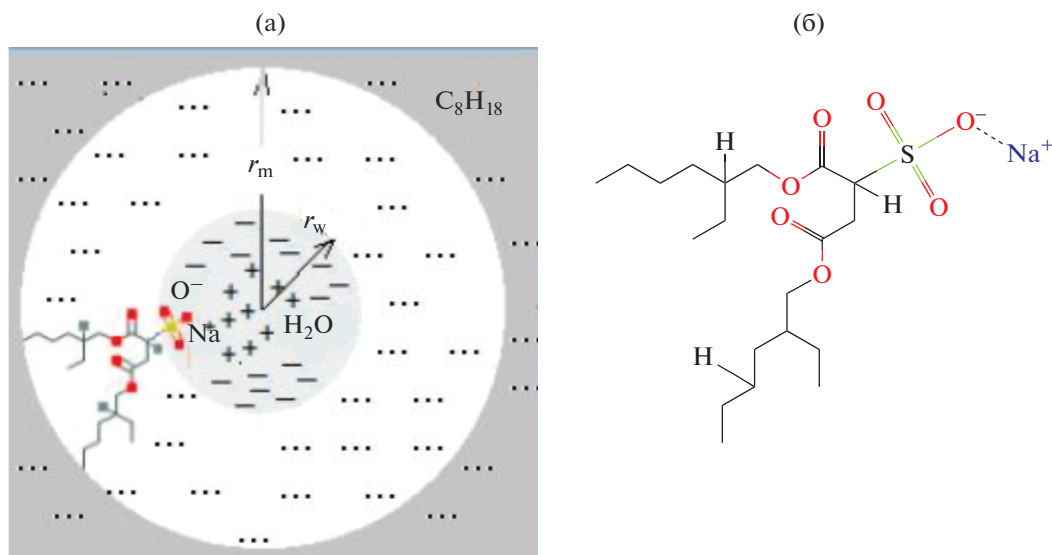


Рис. 1. Схема обратной мицеллы в водно-органическом растворе $\text{H}_2\text{O}/\text{AOT}/\text{изооктан}$: r_m и r_w – радиусы мицеллы и водного пула, соответственно (а); структурная формула АОТ – 1,4-бис-(2-этилгексил)-сульфосукцинат натрия (б).

Именно поляризованность воды в пуле обратной мицеллы обеспечивает возможность использования водно-органических ОМР в качестве “микрореакторов” для синтеза стабилизированных НЧ металлов “снизу-вверх”. Ранее при изучении направленных синтезов НЧ металлов [5, 6] нами не учитывались особенности самоорганизации (SA) в ОМС, роль поляризованности воды в водном пуле мицелл и роль процессов SA в формировании НЧ. На данном этапе исследований существует необходимость детектировать наночастицы, которые, как предполагается, могут образовываться в коллоидных системах за счет SA. В связи с этим было проведено тщательное изучение изменений оптических характеристик растворов 0.15 М АОТ в изооктане в аэробных условиях без применения восстановителей и воздействия ионизирующего излучения сразу после введения ионов Fe^{2+} и далее в зависимости от времени хранения образцов. Также был поставлен вопрос о вкладе процессов SA на всех стадиях формирования НЧ металлов в ОМР при направленном проведении RadChem и Chem синтезов НЧ Fe. Во всех экспериментах спектры оптического поглощения исходных растворов и образцов ОМР НЧ Fe регистрировали с помощью спектрофотометра “Hitachi U-3310” относительно раствора 0.15 М АОТ/изооктан в присутствии кислорода воздуха при комнатной температуре. Длина оптического пути кварцевой кюветы 1.0 мм.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Химический (Chem) синтез [3, 5]. Для химического восстановления ионов железа в обратноми-

целлярной системе в качестве восстановителя использовано природное полифенольное соединение кверцетин (Qr). Способ получения наночастиц основан на способности ионов железа к образованию обратимых комплексов с частичным переносом заряда с молекулами флавоноида Qr и кислорода [11]. Методами переменного-токовой вольтамперометрии и спектрофотометрии было доказано, что формирование наночастиц металлов в организованных мицеллярных системах происходит за счет внутримолекулярного переноса электрона в тройном кислородсодержащем комплексе с частичным переносом заряда ($\text{Qr}^{\delta+} \dots \text{Fe}^{2+} \dots \text{O}_2^{\delta-}$) [5, 11]. Последующее агрегирование восстановленных ионов в организованной системе ОМР приводит к формированию наноразмерных частиц Fe_n^{m+} . Комплексы Qr с Fe^{2+} и O_2 были идентифицированы спектрофотометрически по bathochromному смещению полосы оптического поглощения Qr в присутствии ионов железа и по изменению потенциала восстановления молекулы кислорода в этих растворах [11, 12].

Для формирования НЧ Fe использовали раствор 150 мкМ Qr/ 0.15 М АОТ/изооктан, в который вводился водный раствор 0.3 М соли Мора $\text{FeSO}_4 \cdot (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (серножелезистоаммиачная соль) в соответствии с выбранными значениями коэффициентов солюбилизации ($\omega = [\text{H}_2\text{O}]/[\text{AOT}]$): $\omega_1 = 1.5$; $\omega_2 = 3.0$ и $\omega_3 = 5.0$). Спектры оптического поглощения ОМР НЧ Fe Chem были зарегистрированы в разные моменты времени. На рис. 2 представлены спектры ОМР НЧ Fe Chem со значением $\omega_1 = 1.5$.

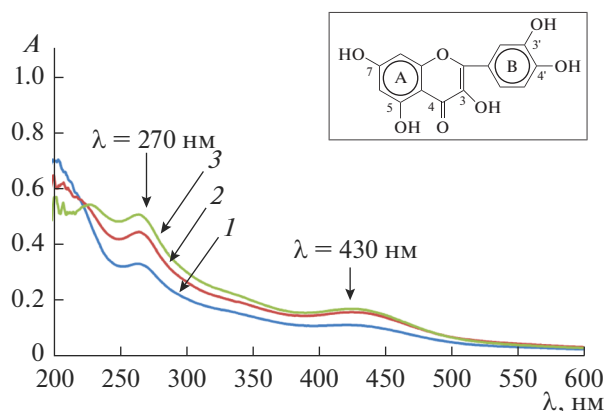


Рис. 2. Спектры оптического поглощения ОМР растворов НЧ Fe при $\omega = 1.5$ в зависимости от времени синтеза Δt , сут: 1 (1); 8 (2); 15 (3). $[\text{Fe}^{2+}]$ в исходном водном растворе соли 0.3 М; в водном пуле $[\text{Fe}^{2+}]_{\text{W.P.}} = 0.3 \text{ М (const)}$, в ОМР $[\text{Fe}^{2+}]_{\text{ОМР}} = 1.2 \text{ мМ}$. На вставке: структурная формула Qr (3,5,7,3',4'-пентагидроксифлавона).

На представленных спектрах в зависимости от продолжительности Δt синтеза, наблюдается увеличение оптической плотности полосы поглощения ОМР НЧ Fe ($\lambda \sim 270 \text{ нм}$) и изменение полосы при $\lambda \sim 200\text{--}230 \text{ нм}$. С течением времени (до 15 сут) наблюдается снижение интенсивности поглощения в УФ-области спектра (спектр 1) и, отчетливое проявление пика НЧ Fe при $\lambda_{\text{макс}} \sim 230 \text{ нм}$ (спектр 3). При низкой концентрации ионов $[\text{Fe}^{2+}]_{\text{ОМР}} = 1.2 \text{ мМ}$ в ОМР ($\omega = 1.5$) регистрируется полоса при $\lambda \sim 430 \text{ нм}$, которая связана с поглощением лабильного комплекса ($\text{Qr}^{\delta+} \dots \text{Fe}^{2+} \dots \text{O}_2^{\delta-}$). Изменение спектров оптического поглощения ОМР НЧ Fe при $\omega = 5.0$ за тот же самый период времени Δt (15 сут) показано на рис. 3.

Видно, что на 15-е сут (спектр 3) полоса поглощения комплекса отсутствует при заметном росте интенсивности полос ОП, характерных для НЧ железа, включая полосу при $\lambda \sim 230 \text{ нм}$. Данные по изменению оптической плотности НЧ Fe при 270, 350 нм и комплекса $[\text{Qr}^{\delta+} \dots \text{Fe}^{2+} \dots \text{O}_2^{\delta-}]$ при $\lambda_3 = 430 \text{ нм}$ в ОМР при трех значениях $\omega_{(i)}$ (1.5, 3.0, 5.0) представлены в табл. 1.

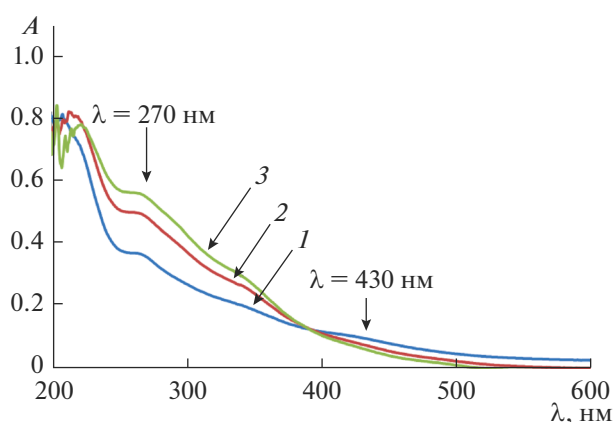


Рис. 3. Спектры оптического поглощения ОМР НЧ Fe при $\omega = 5.0$ в зависимости от Δt , сут: 1 (1); 8 (2); 15 (3). Концентрация ионов в водном пуле, $[\text{Fe}^{2+}]_{\text{W.P.}} = 0.3 \text{ М (const)}$, $[\text{Fe}^{2+}]_{\text{ОМР}} = 4.0 \text{ мМ}$ при значении $\omega = 5.0$.

Размеры НЧ Fe, полученные методом динамического рассеяния света в первые часы после синтеза, приведены и обсуждались в работе [21].

На рис. 3 показано, что интенсивность поглощения НЧ Fe в ОМС при $\omega = 5.0$ (рис. 3) также повышается в зависимости от продолжительности синтеза, Δt , что свидетельствует об увеличении количества наночастиц. При этом ОП ОМР при $\lambda \sim 270 \text{ нм}$ и $\lambda \sim 350 \text{ нм}$ зависит (нелинейно) от содержания ионов железа в мицеллярном растворе. В ОМР ($\omega = 5.0$) при более высокой концентрации ионов Fe в ОМР = 4.0 мМ на основании данных табл. 1 и анализа спектров на рис. 3 можно наблюдать увеличение ОП НЧ Fe Chem даже при низком остаточном поглощении комплекса ($\text{Qr}^{\delta+} \dots \text{Fe}^{2+} \dots \text{O}_2^{\delta-}$). Следовательно, при Chem синтезе увеличение интенсивности поглощения НЧ Fe в ОМР и продолжение образования НЧ со временем почти при полном расходовании восстановителя кверцетина может происходить за счет вклада процессов SA, наблюдаемых в коллоидных ОМС [8].

Радиационно-химический НЧ Fe (RadChem) синтез [2, 6]. Процесс восстановления ионов и формирование НЧ Fe RadChem происходит в анаэробных условиях при внешнем воздействии ионизирующего излучения за счет взаимодей-

Таблица 1. Изменение оптической плотности ОМР ($\omega_{(i)}$) при λ_{1-3} и $\Delta t_{(j)}$

| $\omega_{(i)}$ | $\Delta t_{(j)}$ ОП при λ_{1-3} | $\lambda_1 = 270 \text{ нм}$ | | | $\lambda_2 = 350 \text{ нм}$ | | | $\lambda_3 = 430 \text{ нм}$ | | |
|----------------|---|------------------------------|-------|--------|------------------------------|-------|--------|------------------------------|-------|--------|
| | | 1 сут | 8 сут | 15 сут | 1 сут | 8 сут | 15 сут | 1 сут | 8 сут | 15 сут |
| 1.5 | | 0.32 | 0.44 | 0.52 | 0.14 | 0.19 | 0.20 | 0.11 | 0.18 | 0.20 |
| 3.0 | | 0.35 | 0.46 | 0.58 | 0.17 | 0.22 | 0.28 | 0.09 | 0.09 | 0.09 |
| 5.0 | | 0.36 | 0.49 | 0.59 | 0.19 | 0.26 | 0.27 | 0.10 | 0.07 | 0.07 |

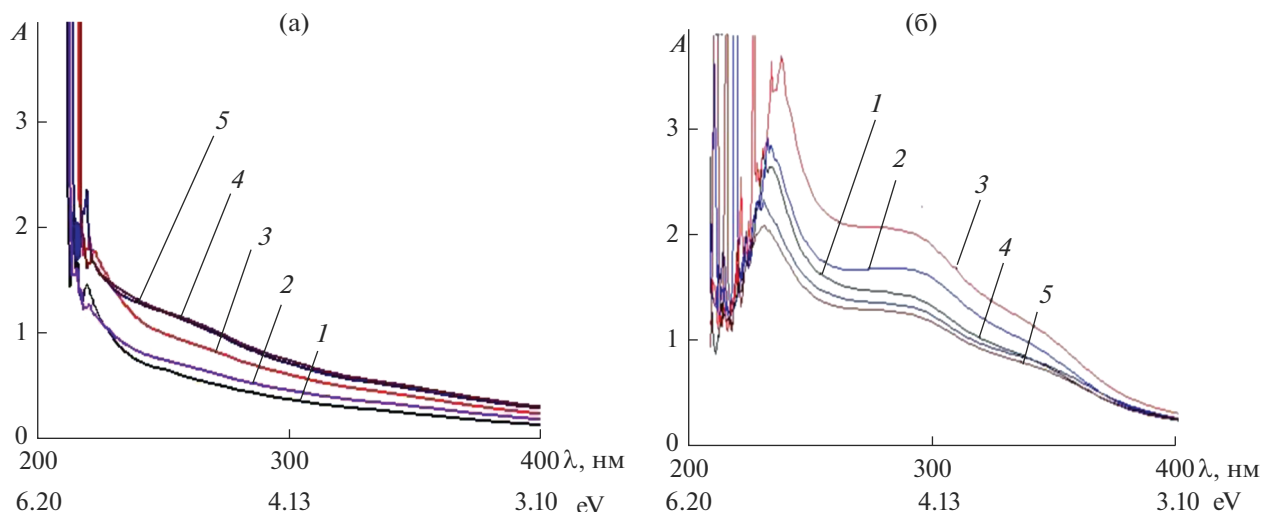


Рис. 4. Спектры оптического поглощения НЧ Fe в ОМР ($\omega = 5.0$), облученных при дозах, кГр: 5.0 (1), 10.0 (2), 15 (3), 20 (4), 25 (5). Спектры записаны в спектральном диапазоне от 200 до 500 нм после облучения, $\Delta t < 4$ ч (а); после облучения, $\Delta t = 4$ мес. (б).

ствия с короткоживущими продуктами радиолиза воды, обладающих восстановительными свойствами: e_{solv}^- , H, R(i). Для удаления окислительной компоненты радикала OH, вводится изопропиловый спирт, который при взаимодействии с OH переходит в восстановительный *оксиизопропильный* радикал и тоже участвует в реакции восстановления ионов и в образовании НЧ Fe. Для синтеза использовали 0.3 М водный раствор соли Мора в 0.15 М растворе АОТ в изооктане, в объемах, соответствующих выбранным значениям $\omega = [\text{H}_2\text{O}]/[\text{АОТ}]$. Приготовленные растворы в ампулах герметизировали и облучали потоком ускоренных электронов при использовании установки УЛВ-10-10-С-70 (ИФХЭ РАН) при мощности дозы 3×10^3 Гр/с. Дозы облучения были выбраны в диапазоне от 5.0 до 25 кГр.

При изучении механизма формирования НЧ RadChem в ОМР [6] было установлено, что ключевыми варьируемыми параметрами радиационно-химического синтеза НЧ металлов является доза и мощность дозы излучения, которые во многом определяют скорость процесса генерации, величину радиационного выхода короткоживущих восстановительных частиц в *момент* радиолиза, а также увеличение выхода наночастиц в *пострадиационный период*. Поскольку в RadChem синтезе можно использовать высокие мощности дозы излучения, т.е. предельно короткие времена воздействия на систему, то появилась надежда найти различия в оптических свойствах НЧ Fe, зарегистрированных сразу после прекращения воздействия потока ускоренных электронов и НЧ, появляющихся в *пострадиационный период*. Влияние дозы облучения на оптические характе-

ристики НЧ Fe в ОМР при значении $\omega = 5.0$ представлены на рис. 4. Ампулы с облученными в деаэрированных условиях образцами ОМР при $[\text{Fe}^{2+}]_{\text{ОМР}} = 4$ мМ были вскрыты через 2–4 ч после конца облучения и измерены их спектры поглощения. Дальше облученные образцы хранились в присутствии воздуха, в темноте при комнатной температуре.

По оптическим характеристикам представленных спектров на рис. 4б (разрешимость, более четкие значения $\lambda_{\text{макс}}$ полос поглощения, их интенсивность) указанных образцов можно судить о большой эффективности процесса *образования* НЧ Fe в *пострадиационный период* в ОМР за счет процессов SA наноструктур, который ведет к увеличению общего выхода НЧ Fe после облучения при мощности дозы (3×10^3 Гр/с). Однако зависимость RadChem выхода НЧ Fe от дозы имеет сложный характер. Для образцов ОМР НЧ Fe RadChem зависимость ОП = f (Доза) показана на рис. 4а. Можно видеть, что если спектры записаны сразу после облучения, то ОП образцов уже после дозы >20 кГр почти не изменяется. В спектрах этих же образцов, зарегистрированных через 4 мес. в *пострадиационный период*, увеличение интенсивности ОП за счет SA НЧ наблюдается только в ОМР НЧ Fe после облучения при дозах 5.0, 10 и 15 кГр, как показано на рис. 4б. В образцах ОМР НЧ Fe, облученных при дозе 20 и 25 кГр оптическая плотность всех характерных полос спектра ниже, чем образца (15 кГр), но соотношения интенсивностей полос и их разрешение почти не изменилось. Можно сделать вывод, что дозы >15 кГр для синтеза RadChem НЧ Fe в ОМР данного состава менее эффективны. Действи-

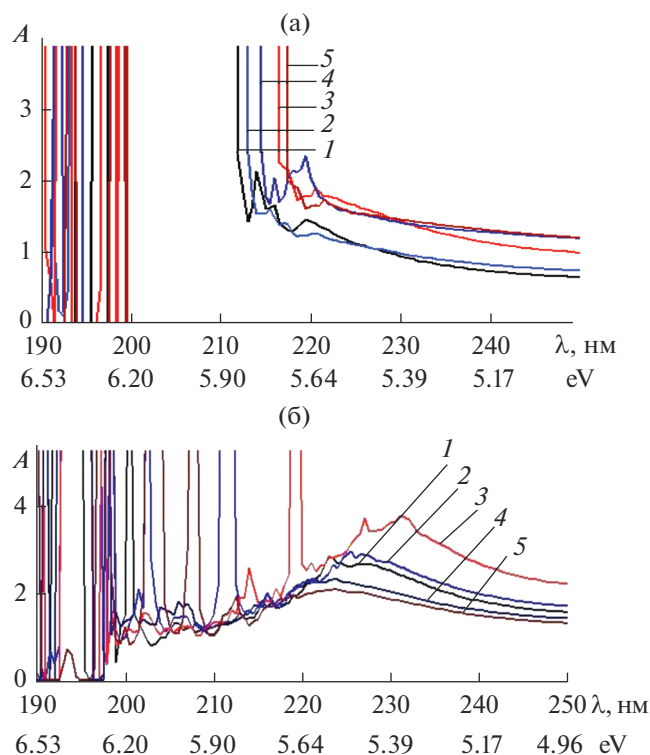


Рис. 5. Спектры оптического поглощения НЧ Fe в ОМР ($\omega = 5.0$), облученных при дозах, кГр: 5.0 (1), 10.0 (2), 15 (3), 20 (4), 25 (5). Спектры записаны после облучения через ~2–4 ч в спектральном диапазоне от 190 до 250 нм (а); через 4 мес. (б).

тельно, в ОМР некоторых облученных образцов при дозах >20 кГр было обнаружено некоторое количество НЧ Fe в осадке.

Измерение спектров электронного плазмонного резонанса в УФ-области образцов ОМР НЧ Fe без их разбавления (которое нежелательно для коллоидных самоорганизующихся систем) позволило зарегистрировать некоторые дополнительные изменения в спектрах сразу после внешнего воздействия ионизирующего излучения в пострadiационный период. Спектры оптического поглощения образцов ОМР НЧ Fe RadChem, облученных при разных дозах, зарегистрированных через 2–4 после облучения и через 4 мес. хранения представлены на рис. 5а и 5б, соответственно.

Сравнение представленных спектров на рис. 6 показывает существенное отличие характера спектра “поглощения” образца ОМР НЧ Fe через 4 мес. после RadChem синтеза в диапазоне от 200 до 250 нм, особенно в высоко энергетической области (интенсивность которого уходит за пределы измерений, принятых в спектрофотометрии). Представляет интерес сравнить изменения в спектрах оптического поглощения образцов НЧ Fe в ОМР при одном значении $\omega = 5.0$, но для раз-

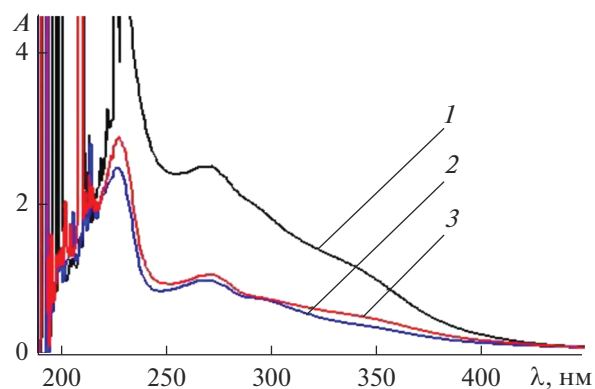


Рис. 6. Спектры оптического поглощения НЧ Fe в ОМР ($\omega = 5.0$): НЧ Fe RadChem (Доза 15 кГр) (1), после облучения через ~2–4 ч; ОМР НЧ Fe Chem (2), ОМР НЧ Fe SA (3) после введения раствора соли.

ных первичных процессов инициирования реакций восстановления. Для НЧ Fe RadChem взяты образцы, облученные до 15 кГр, поскольку процессы “самообразования” НЧ Fe в образцах, облученных при более высоких дозах проходят с меньшей эффективностью.

На рис. 6 представлены спектры ОП образцов ОМР 0.15 М АОТ/изооктан ($\omega = 5.0$) при $[\text{Fe}^{2+}]_{\text{ОМР}} = 4$ мМ: НЧ Fe RadChem через $\Delta t = 2-4$ ч после облучения (доза 15 кГр) – спектр 1; НЧ Fe Chem после введения водного раствора ионов Fe^{2+} в раствор 150 мкМ Qr/0.15 М АОТ/изооктан – спектр 2; и образцов НЧ Fe SA в 0.15 М АОТ/изооктан после введения ионов – спектр 3.

Можно отметить, что наибольшую интенсивность спектров поглощения имеют образцы НЧ Fe RadChem, а образцы НЧ Fe Chem, т.е. без внешнего воздействия (облучения), а образцы НЧ Fe SA и без восстановителя Qr, имеют близкие спектры и по интенсивности, и по форме.

Изменение спектров образцов ОМР НЧ Fe Chem ($\omega = 5.0$) и НЧ Fe SA ($\omega = 5.0$), зарегистрированных при первом измерении, $\Delta t < 2$ ч (рис. 6), и через 4 мес., можно сравнить с представленными спектрами на рис. 7. Если при первом измерении оптическая плотность при $\lambda_{\text{макс}} \sim 275$ нм и для НЧ Fe Chem и НЧ Fe SA была почти одинаковой и равной ~ 1.0 , то через 4 мес. ОП при $\lambda_{\text{макс}} \sim 285$ нм для НЧ Fe Chem (спектр 3) выросла до ~ 2.2 , а для НЧ Fe SA (спектр б) – только до ~ 1.4 .

Таким образом, при изучении оптических свойств обратномиллярных растворов НЧ Fe RadChem, НЧ Fe Chem и НЧ Fe SA, полученных методами “молекулярной сборки”, при использовании различных способов инициирования реакций восстановления, за счет вклада процессов самоорганизации самопроизвольного образования упорядоченных пространственных структур в

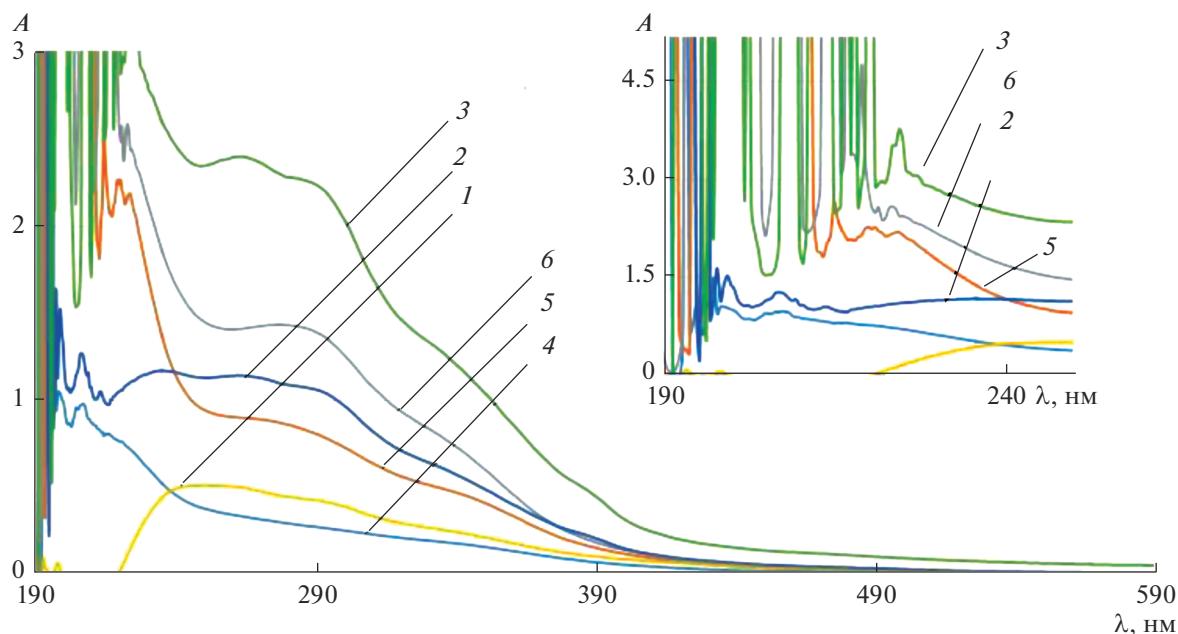


Рис. 7. Спектры оптического поглощения НЧ Fe в ОМР: спектры НЧ Fe Chem (1–3), НЧ SA (4–6) записаны через 4 мес. хранения образцов: $\omega = 1.5$ (1, 4), $\omega = 3.0$ (2, 5), $\omega = 5.0$ (3, 6). Вставка: УФ – часть спектров НЧ Fe Chem и НЧ SA в диапазоне от 190 до 240 нм.

ОМР обнаружено увеличение интенсивности плазмонного электронного резонанса и изменения оптических характеристик спектров НЧ Fe в видимой и в УФ-области спектра. Для объяснения формирования НЧ Fe SA можно предположить, что поляризованная вода в водных пулах

мицелл может выполнять в обратномиецеллярных системах роль “восстановителя”.

Подтверждение формирования именно металлических НЧ Fe в процессах Chem и SA получено методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с использованием комплекса на базе электронного микроскопа LEO 912 ab. Микрофотографии ПЭМ и дифракционные картины образцов НЧ Fe SA и НЧ Fe Chem представлены на рис. 8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных спектрофотометрических исследований оптических свойств ОМР НЧ Fe, синтезированных при различных способах иницирования первичных актов реакций восстановления ионов железа и последующего формирования наноструктур методом “молекулярной сборки” позволило зарегистрировать появление наноразмерных частиц в *пост-радиационный* период при RadChem и при хранении образцов при Chem синтезе. В RadChem методе в короткие промежутки времени воздействия импульсов ускоренных электронов в ОМР появляются промежуточные частицы $e_{\text{сольв}}^-$, атомы H, R(i) – короткоживущие компоненты радиолитического H₂O в водном пуле мицелл, обладающие высокими восстановительными потенциалами. Реакции восстановления ионов металлов в Chem синтезе в ОМР в аэробных условиях протекают в присут-

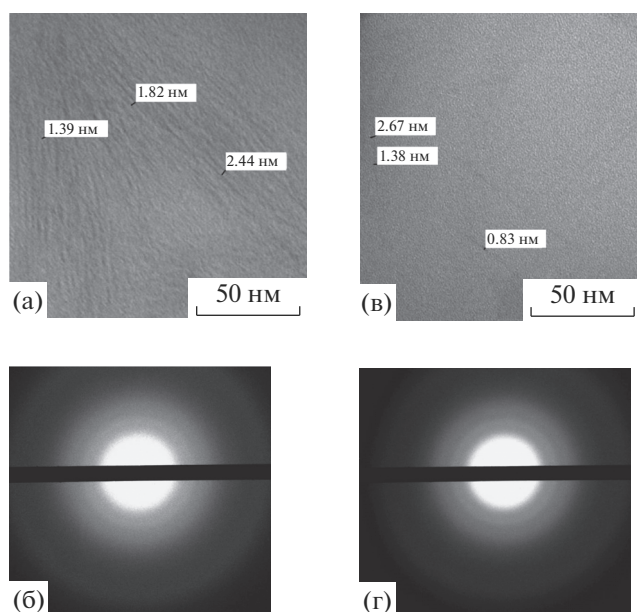


Рис. 8. Микрофотографии и дифракционные картины ПЭМ НЧ Fe в ОМР ($\omega = 3.0$): НЧ Fe SA (а, б) и НЧ Fe Chem (в, г) соответственно.

ствии катализатора кверцетина. Оценить роль процессов самоорганизации образования упорядоченных наноструктур, т.е. процессов, не требующих направленных воздействий или присутствия катализаторов, удалось при исследовании методами спектрофотометрии и ПЭМ формирования НЧ Fe в ОМР, того же химического состава, как и в RadChem и Chem методах. На основании данных рентгеновской дифракции дано подтверждение SA – формированию НЧ Fe, размеры которых зарегистрированы в диапазоне от 1.0 до 3.0 нм.

Таким образом, на каждой стадии формирования НЧ Fe проявляются четко присущие конкретному методу синтеза (RadChem или Chem) особенности поведения НЧ в ОМР и различный вклад процессов самоорганизации в общий процесс формирования наноструктур. Зарегистрированные эффекты позволяют сделать предположение, что механизм формирования НЧ Fe SA в обратных мицеллах основан на способности поляризованной воды в пуле мицеллы выполнять роль “восстановителя” ионов металла.

Изучение механизма формирования НЧ металлов в ОМР, включая процессы самоорганизации, является важным для понимания процессов эволюционного образования в аэробных условиях наноразмерных объектов в самоорганизующихся системах живой природы. Исследование процессов самоорганизации – одно из многообещающих междисциплинарных научных направлений последних лет [22].

Авторы выражают благодарность доценту кафедры физики полимеров и кристаллов физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова С.С. Абрамчуку за помощь в проведении исследований методом ПЭМ.

Исследования выполнены с использованием ускорителя УЛВ-10-10-С-70 “Центра коллективного пользования физическими методами исследования ИФХЭ РАН”.

Работа частично выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-03-00665).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Petit C., Lixon P., Pileni M.-P.* // J. Phys. Chem. 1993. V. 97. P. 12974.
2. *Докучаев А.Г., Мясоедова Т.Г., Ревина А.А.* // Химия высоких энергий 1997. Т. 31. № 5. С. 353.
3. *Egorova E.M., Revina A.A.* // Colloids and Surfaces A. 2000. V. 73. P. 87.
4. *Танасюк Д.А., Ревина А.А., Ермаков В.И.* // Научно-емкие технологии. 2012. Т. 13. № 2. С. 9.
5. *Ревина А.А.* Патент РФ № 2312741. Препарат наноразмерных частиц металлов и способ его получения. Бюл. № 35. 20.12.2007. (Chem).
6. *Ревина А.А.* Патент РФ № 2322327 // Б.И. 2008. № 11.
7. *Revina A.A., Kuznetsov M.A., Chekmarev A.M., Boyakov E.E., Zolotarevskii V.I.* // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 2018, vol. 54, Issue 1, pp. 43–50.
8. *Grzelczak Marek, Vermant Jan, Furst Eric M. et al.* // www.acsnano.org. AcsNano. 2010. V. 4. № 7. P. 3591.
9. *Бухтияров В.И., Слинко М.Г.* // Успехи химии. 2001. Т. 70. Вып. 2. С. 167.
10. *Ревина А.А., Кезиков А.Н., Козлов А.И и др.* Патент РФ № 2270831 // Б.И. 2006. № 6.
11. *Ревина А.А.* // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2009. Т. 45. № 1. С. 58.
12. *Ревина А.А., Зайцев П.М.* // Электрохимия. 2012. Т. 48. № 3. С. 1.
13. *Ревина А.А., Воропаева Н.Л., Мухин В.М., Чекмарь Д.В.* // Нетрадиционные природные ресурсы, инновационные технологии и продукты. 2016. Вып. 23. С. 30.
14. *Штыков С.Н., Горячева И.Ю.* // Оптика и спектроскопия. 1997. Т. 83. № 4. С. 698.
15. *Воейков В.И.* // Труды IV Международного конгресса Слабые и сверхслабые поля и изучения в биологии и медицине. 2006. С. 46.
16. *Волошин В.П., Желиговская Е.А., Маленков Г.Г., Наберухин Ю.И., Тытик Д.Л.* Структуры сеток водородных связей и динамика молекул воды в конденсированных водных системах // Российский химический журнал, 2001. Т. XLV. № 3. С. 31.
17. *Zheng J.M., Wexler A., Pollack G.H.* // J. Colloid. Interface Sci. 2009. V. 332. P. 511.
18. *Танасюк Д.А., Цетлин В.В., Ревина А.А., Ермаков В.И.* // Научно-емкие технологии. 2013. Т. 14. № 1. С. 44.
19. *Ермаков В.И., Ревина А.А.* Обратномицеллярные системы: Электромагнитные свойства и структура. Н. Новгород: НИУ РАНХиГС, 2017. 200 с.
20. *Nishimoto J., Iwamoto E., Fujiwara T., Kurnarnaru T.* // J. Chem. Soc. Faraday Trans. 1993. V. 89. № 3. P. 535–538.
21. *Ревина А.А., Дайнеко С.В., Большакова А.Н. и др.* // Научно-емкие технологии. 2011. Т. 12. № 1. С. 68.
22. *Арсланов В.В.* Нанотехнология. Коллоидная и супрамолекулярная химия. Энциклопедический справочник. М.: ЛЕНАНД, 2015. 400 с.