



Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 538.9

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9267>

**Исследования био- наногибридного материала на основе бактериального ферритин-подобного белка Dps методами ПЭМ и РФЭС**

Е. В. Паринава<sup>1</sup> ✉, С. С. Антипов<sup>1,2</sup>, Е. А. Беликов<sup>1</sup>, О. А. Чувенкова<sup>1</sup>, Ю. С. Какулия<sup>1</sup>, Д. А. Коюда<sup>1</sup>, С. Ю. Требунских<sup>1</sup>, М. С. Скоробогатов<sup>1</sup>, Р. Г. Чумаков<sup>3</sup>, А. М. Лебедев<sup>3</sup>, А. А. Синельников<sup>1</sup>, В. Г. Артюхов<sup>1</sup>, О. В. Овчинников<sup>1</sup>, М. С. Смирнов<sup>1</sup>, С. Ю. Турищев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный университет,  
Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт биофизики клетки РАН  
ул. Институтская, 3, Пущино 142290, Российская Федерация

<sup>3</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
Академика Курчатова пл., 1, Москва 123182, Российская Федерация

**Аннотация**

Работа посвящена исследованиям биогибридного наноматериала, сформированного на основе белковых молекул рекомбинантного ферритина Dps бактериального происхождения.

Для получения рекомбинантного белка в качестве продуцентов использовались клетки *Escherichia coli*, а очистку осуществляли хроматографически. Источником атомов железа для формирования биогибридного наноматериала служила соль Мора. Возможность формирования гибридных частиц, форма и размер их неорганических ядер изучались экспериментально методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения. Состав и специфика физико-химического состояния неорганических ядер гибридных частиц изучались методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, включая применение фокусированного ионного травления.

Показано, что с использованием выбранного способа формирования наноматериала внутренние полости белковых молекул депонировали неорганические наночастицы. Размеры этих наночастиц, формирующихся в полых молекулах белка, составили в среднем 2 нм. Установлен сложный композитный состав частиц, преимущественно включающий оксиды системы железо-кислород, а также возможны включения металлического железа.

Полученные результаты показывают возможность плавного, через состав, управления свойствами биогибридного наноматериала. Это делает его крайне привлекательным для реализации задач современных технологий таких, как спинтроника или адресная доставка функциональных наночастиц.

**Ключевые слова:** наноструктуры, биомолекулы, гибридные материалы, развитая поверхность, рекомбинантный белок ферритин-подобный Dps, просвечивающая электронная микроскопия, совмещение, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия

**Источник финансирования:** Работа выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации СП-189.2021.1 для молодых ученых. Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования России в рамках соглашения N 075-15-2021-1351 в части методологии измерений рентгеновских фотоэлектронных спектров.

✉ Паринава Елена Владимировна, e-mail: [parinova@phys.vsu.ru](mailto:parinova@phys.vsu.ru)

© Паринава Е. В., Антипов С. С., Беликов Е. А., Чувенкова О. А., Какулия Ю. С., Коюда Д. А., Требунских С. Ю., Скоробогатов М. С., Чумаков Р. Г., Лебедев А. М., Синельников А. А., Артюхов В. Г., Овчинников О. В., Смирнов М. С., Турищев С. Ю., 2022



**Для цитирования:** Паринава Е. В., Антипов С. С., Беликов Е. А., Чувенкова О. А., Какулия Ю. С., Коюда Д. А., Требунских С. Ю., Скоробогатов М. С., Чумаков Р. Г., Лебедев А. М., Синельников А. А., Артюхов В. Г., Овчинников О. В., Смирнов М. С., Турищев С. Ю. Исследования био- наногибридного материала на основе бактериального ферритин-подобного белка Dps методами ПЭМ и РФЭС. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2022;24(2): 265–272. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9267>

**For citation:** Parinova E. V., Antipov S. S., Belikov E. A., Chuvenkova O. A., Kakuliia I. S., Koyuda D. A., Trebunskikh S. Yu., Skorobogatov M. S., Chumakov R. G., Lebedev A. M., Sinelnikov A. A., Artyukhov V. G., Ovchinnikov O. V., Smirnov M. S., Turishchev S. Yu. TEM and XPS studies of bio-nanohybrid material based on bacterial ferritin-like protein Dps. *Condensed Matter and Interphases*. 2022;24(2): 265–272. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9267>

## 1. Введение

Синтез и исследования новых функциональных материалов является крайне востребованной задачей в науке, технике и технологиях. Большой научный и практический интерес привлекают природоподобные технологии формирования функциональных наноматериалов. Это обусловлено такими перспективными особенностями, как высокая эффективность и воспроизводимость в совокупности с незначительными экономическими затратами при внедрении в производство этих технологий, основанных на биосинтезе, по сравнению с физическими или химическими методами синтеза наноматериалов [1–2]. Удачным примером такой природоподобной технологии формирования функциональных наноматериалов может служить синтез неорганических наночастиц внутри природной белковой молекулы. Ферритины – это сложные природные комплексные структуры, состоящие из белковой оболочки и неорганического (металл-оксидного) ядра, размером порядка десяти нм [3–4].

Ферритин-подобный белок Dps (DNA-binding Protein from Starved cells – ДНК-связывающий белок голодающих клеток) обладает уникальным набором свойств, среди которых сродство к железу, малые размеры и способность образовывать прочные комплексы с ДНК [5–7]. Состав и структура ядра Dps находится в строгой зависимости от способа его выделения и очистки, условий хранения, а также способов дальнейшей модификации и использования [8–9]. Ранее нами была показана возможность формирования двумерных структур молекулами ферритина Dps [10], однако ясного представления об особенностях строения неорганического ядра Dps пока нет. В настоящей работе была использована комбинация методов просвечивающей электронной микроскопии – ПЭМ и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии РФЭС, дающая информацию о составе, морфологии и физико-химическом состоянии изучаемого объекта.

Таким образом, актуальным является исследование образования гибридных наноструктур с неорганическим наночастицами – ядрами белковых молекул ферритина Dps. Настоящая работа посвящена изучению неорганических ядер в структуре гибридного материала на основе ферритина Dps, включая анализ их размеров и состава в условиях равновесного и стимулированного дополнительным введением ионов железа формирования наночастиц.

## 2. Экспериментальная часть

Рекомбинантный белок Dps получался с использованием клеток *Escherichia coli* BL21\*(DE3) в качестве продуцентов. Клетки *E. coli* были трансформированы плазмидой pGEM\_dps. В работе [11] приведены подробные сведения о получении рекомбинантного белка, очищенного от неорганических компонентов с помощью ступенчатого гидролиза и диализа, его последующем выделении и очистке. Раствор белка имел концентрацию 1.2 мг/мл в буфере, содержащем 10 mM NaCl, 50 mM tris-HCl (pH 7.0) и 0.1 mM EDTA. В качестве источника железа использовали свежеприготовленный раствор соли Мора  $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , которую добавляли в раствор белка до достижения концентрации ионов железа 0.25 mM и инкубировали его в течение 15 минут, после чего добавляли такую же порцию соли Мора и повторяли инкубацию, полученный образец использовали в исследованиях.

Размеры белковых молекул контролировались методом динамического светорассеяния согласно методике, описанной в работе [12]. Для экспериментов методом ПЭМ использовались подготовленные тонкие углеродные реплики толщиной ~ 15 нм, на которые помещалась молекулярная культура путем погружения в раствор и последующего вакуумирования в камере загрузки микроскопа Zeiss LIBRA 120. Для оценки количества и размеров наночастиц использовался программный пакет Image J.

Для экспериментов методом РФЭС молекулы белка осаждались на поверхность сформиро-

ванных и предварительно очищенных подложек кремния наслаиванием 10 мкл раствора. После чего полученная структура высушивалась в лабораторных условиях, промывалась деионизированной водой (вытягиванием) с целью удаления остаточных солей и вновь высушивалась при тех же условиях.

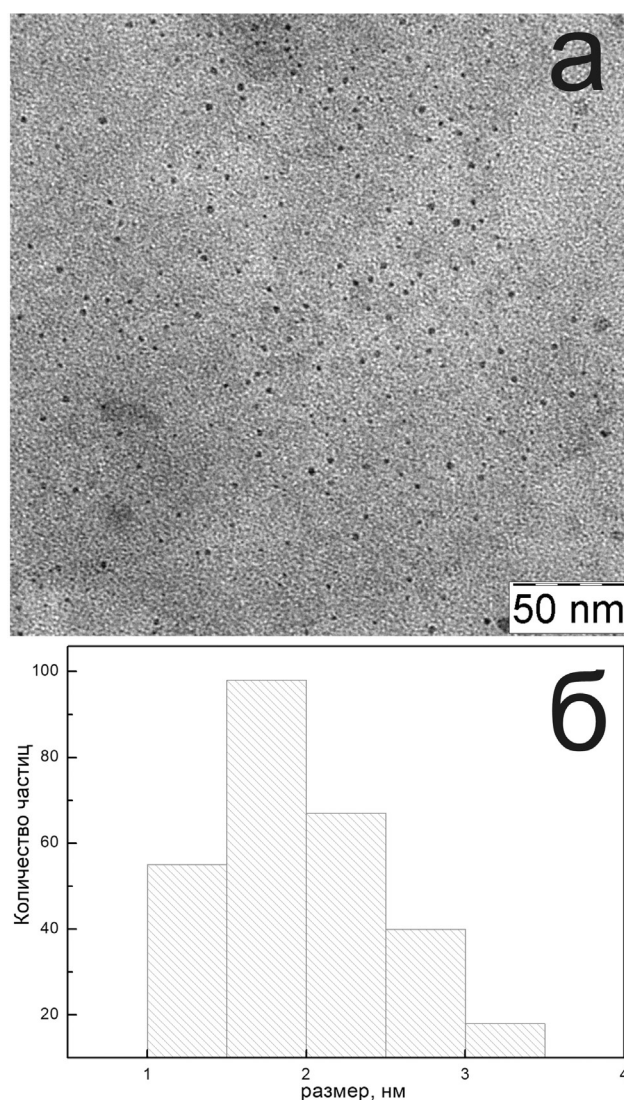
Исследования методом РФЭС производились на модуле ЭСХА сверхвысоковакуумной экспериментальной станции НАНОФЭС синхротрона «Курчатов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (Москва), оснащенном анализатором энергий электронов SPECS Phoibos 150 [13]. Использовалось монохроматизированное AlK $\alpha$  излучение рентгеновской трубки (1486.61 эВ), глубина информативного слоя составила ~ 2–3 нм [14]. Были зарегистрированы обзорные спектры в диапазоне энергий связи 0–800 эВ и данные Fe 2*p* состояний, для интерпретации которых использовались измерения эталонных структур: металлической фольги железа, покрытой естественным оксидом, а также коммерчески доступных порошков соединений Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и FeO(OH) производства AlfaAesar. Использовался стандартный подход к нормализации и калибровке данных, основанный на независимой регистрации сигнала чистой золотой фольги (Au 4*f*). Для регистрации спектральных данных эталонных соединений железа использовалась калибровка по C 1*s* линии углеводородных загрязнений [14]. Для сопоставления и анализа основных особенностей Fe 2*p* РФЭС спектров использовались известные базы данных, из которых были выбраны актуальные и наиболее точные (монохроматические) спектры [14–16]. Использовался сфокусированный источник травления поверхности ионами аргона при ускоряющем напряжении 1 кВ с длительностью травления 30 минут. Площадь участка травления выбиралась с превышением области поверхности, от которой регистрировались данные РФЭС.

### 3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены данные ПЭМ высокого разрешения для био- наногибридного материала на основе бактериального ферритин-подобного белка Dps и оценка распределения средних размеров неорганических наночастиц, составляющих «ядро» молекул и их количества.

Полученные методом динамического светорассеяния данные о распределении размеров молекул совпадают с результатами [12], что гово-

рит об успешном синтезе молекулярной культуры. Данные ПЭМ подтверждают факт депонирования неорганических наночастиц во внутренних полостях молекул в результате введения в культуральный раствор белка соли Мора. Неорганические частицы имеют практически идентичную форму, агрегации не наблюдаются, вероятнее всего из-за наличия белковых стенок отдельных молекул, которые препятствуют их слипанию. При этом средний размер частиц составил около 2 нм, что почти в два раза меньше данных [11]. Такой эффект может наблюдаться по нескольким причинам: из-за недостатка количества ионов железа в растворе для полного



**Рис. 1.** Данные ПЭМ био- наногибридного материала на основе бактериального ферритин-подобного белка Dps (а). Оценка распределения средних размеров неорганических наночастиц и их количества (б)



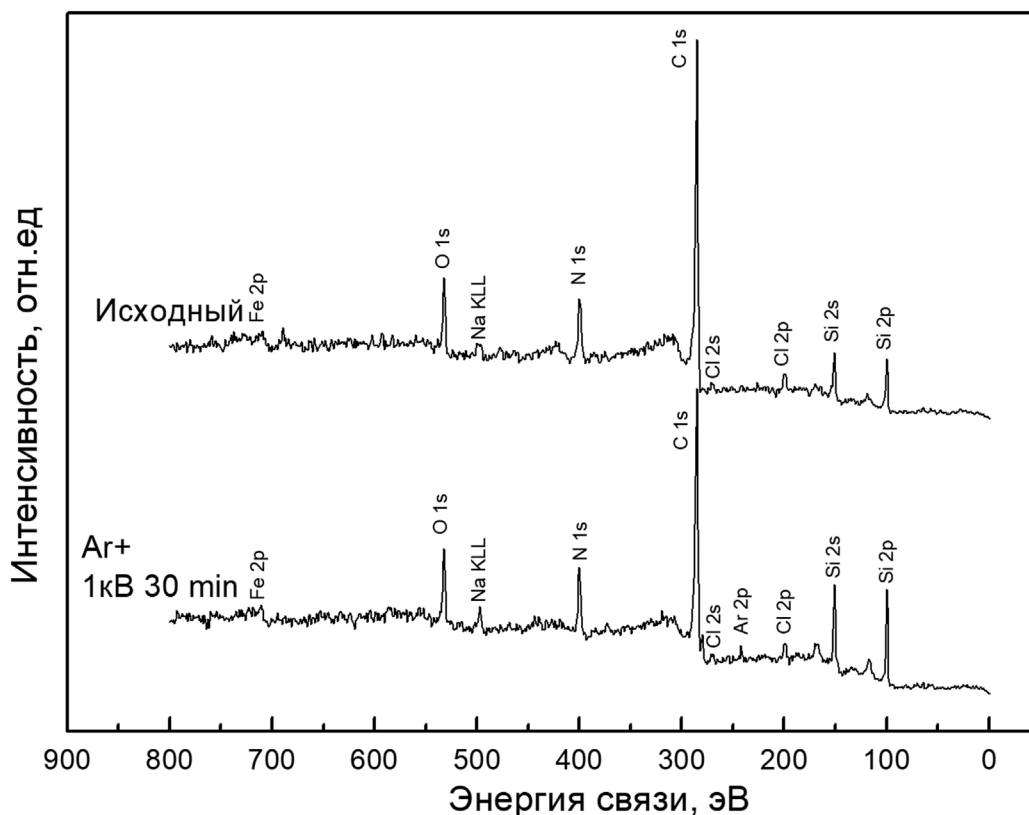
заполнения молекул, недостаточного времени инкубации, использования ступенчатого насыщения молекул белка. По результатам оценки количество частиц в поле зрения составило ~ 280.

На рис. 2 приведены обзорные рентгеновские фотоэлектронные спектры исходной поверхности подготовленного образца и после получасового травления ионами аргона при ускоряющем напряжении 1 кВ. Отметим, что данное значение относилось к самому «мягкому» воздействию на поверхность, с оценкой удаления 1.5 А в минуту, полученной для подложки кремния.

Согласно данным обзорных фотоэлектронных спектров исходного образца, основной линией является углерод, то есть гибридный материал. Присутствие заметных по интенсивности линий 1s кислорода и азота подтверждает достаточное наличие пробы. Относительно малое количество гибридного материала позволяет надежно регистрировать сигнал от подложки кремния. Также заметны следы соли буферного раствора (линии натрия и хлора). Однако их интенсивность заметно мала, что говорит о достаточной степени промывки пробы после наслаивания.

Наличие соли в слоях поверхности и органического материала пробы в целом не привело к искажениям в положениях линий наблюдаемых основных уровней, связанных с зарядкой поверхности пробы. Наконец, для исходного образца факт наблюдения на обзорном спектре сигнала от депонированных наночастиц железа неочевиден. Тем не менее для регистрации данных 2p основного уровня с высоким разрешением железа нами было выполнено длительное накопление регистрируемого сигнала, о чем будет сказано ниже.

Ситуация незначительно меняется после получасовой обработки (травления) поверхности ионами аргона. После длительного травления положение и относительная интенсивность линии углерода практически не изменились, что свидетельствует о достаточном количестве оставшейся после удаления пробы биогибридного образца. Несколько интенсивнее стали наблюдаться линии подложки кремния (примерно 100 эВ и 150 эВ), подтверждая факт воздействия ионного пучка и частичное удаление стравливаемого образца. При этом наблюдается линия аргона,



**Рис. 2.** Обзорные РФЭС спектры образца подготовленной пробы био- наногибридного материала на основе бактериального ферритин-подобного белка Dps: исходное состояние поверхности (исходный) и после получасового травления ионным пучком (Ar+ 1 кВ 30 мин). Подписаны элементы, составляющие изученную поверхность пробы

что подтверждает предположение о насыщении био-покрытия подложек ионами при обработке и характерно для такого класса материалов.

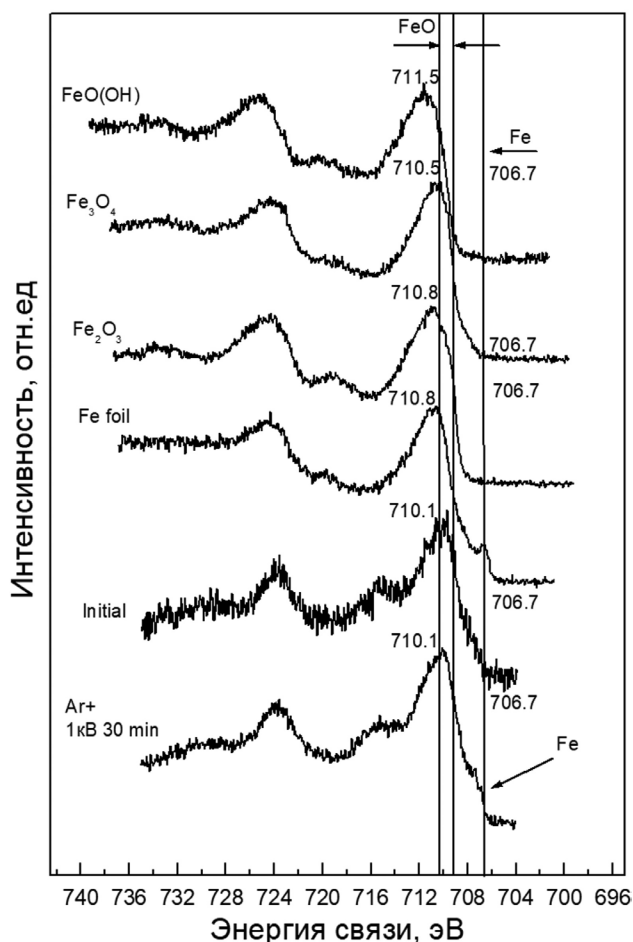
Факт отсутствия на обзорных спектрах (рис. 2) линий основного уровня серы ( $S 2p$  и  $S 2s$  состояния при  $\sim 163$  и  $\sim 228$  эВ соответственно) позволяет сделать заключение об отсутствии остаточных следов соли Мора. Таким образом, источник атомов железа был полностью израсходован на депонирование молекулярной культуры. Влияние промывки может быть исключено, так как после ионного травления (в глубинной части био-покрытия) сигнала от атомов серы не наблюдалось.

Наконец, в районе энергии связи атомов железа (около 710 эВ) наблюдается особенность малой интенсивности. Этот факт подтвердил необходимость увеличенного времени накопления для получения сигнала от атомов железа, который был использован нами для исходного образца.

На рис. 3 приведены данные  $Fe 2p$  рентгеновских фотоэлектронных спектров от подготовленной и обработанной пробы совместно с данными эталонных образцов, зарегистрированными в тех же методических условиях (только со значительно меньшим, не более 20, количеством накоплений). Значения энергии связи для эталонных структур находятся в полном согласии с известными литературными данными [14–16]. Самая существенная неопределенность наблюдается в этих данных для нестабильного при нормальных условиях оксида  $FeO$ , для которого на рис. 3 приведен интервал значений энергии связи  $Fe 2p$  уровня согласно данным использованных источников [14–16]. Таким образом, мы подчеркнули тот интервал энергий связи, в котором возможно наблюдение этого соединения в составе поверхности экспериментального образца. Ранее [12] нами были получены данные синхротронным методом XANES (X-ray Absorption Near Edge Structure, спектроскопия ближней тонкой структуры края рентгеновского поглощения), которые показали ожидаемую сложную структуру и состав неорганических наночастиц био-наногибридного материала.

По этой причине и из-за близости энергий связи наблюдаемых компонент при общем высоком количестве времени накопления сигнала (несколько часов) нами была проведена качественная оценка состава изученной поверхности подготовленной пробы. Для этого была рассмотрена тонкая структура спектров  $Fe 2p$  (рис. 3) и энергетическое положение ее особенностей.

Анализ данных тонкой структуры  $Fe 2p$  РФЭС спектров эталонных образцов при сопоставлении с данными гибридного био-материала позволил провести качественную оценку состава ядер неорганических наночастиц. Положение основного максимума  $Fe 2p$  РФЭС спектров изученной пробы практически неизменно после ионного травления. Таким образом, нами получен сигнал от неорганических наночастиц системы железо-кислород, в том числе и от «объемной» части пробы (после ионного травления). Этот сигнал менее зашумлен. По наше-



**Рис. 3.**  $Fe 2p$  РФЭС спектры высокого разрешения образца подготовленной пробы био-наногибридного материала на основе бактериального ферритин-подобного белка Dps: исходное состояние поверхности (исходный) и после получасового травления ионным пучком ( $Ar^+$  1 кВ 30 мин). Приведены данные эталонных структур: металлической фольги железа, покрытой естественным оксидом ( $Fe$  foil), а также порошков  $Fe_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$  и  $FeO(OH)$ . Подписаны положения основных максимумов наблюдаемых спектральных кривых. Указан диапазон энергий связи для  $FeO$  и линия металлического железа

му мнению, это связано с существенно различными скоростями ионного травления био-окружения и самих неорганических наночастиц. То есть увеличение времени травления приводит к росту количества частиц, доступных для зондирования методом РФЭС. Наиболее интересным является наблюдение особенности при энергиях связи  $\sim 706.7$  эВ, соответствующих металлическому железу (рис. 3). У такого наблюдения возможны две причины. Во-первых, в «объемной» части наночастиц могут присутствовать несвязанные с кислородом атомы железа. Однако слабый сигнал исходного спектра при энергиях связи  $\sim 706.7$  эВ не позволяет подтвердить или опровергнуть это утверждение. Во-вторых, частичное восстановление железа может происходить в результате длительного воздействия ионов аргона. Стабильность данных обзорных спектров (см. рис. 2) не подтверждает такого предположения. Мы планируем дополнительно исследовать этот вопрос в дальнейших экспериментах, при этом эффективно будем применять ступенчатый набор общего режима травления.

Из всех проанализированных нами значений энергий связи [14–16] для эталонных объектов самые близкие значения положения основного максимума образца гибридного био- материала относятся к  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , подтверждая выводы, сделанные ранее [12]. В то же время наблюдаемый сигнал в области энергий связи  $\sim 709$ – $710$  эВ свидетельствует о возможном нахождении в составе наночастиц FeO, что также находится в согласии с [12]. Тем не менее, поскольку РФЭС обладает большей (по сравнению с XANES) чувствительностью к поверхности, то наблюдение достаточно широкого основного максимума исходной экспериментальной пробы и после ионного травления не исключает нахождения в составе наночастиц  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и FeO(OH). Это говорит о сложном, композитном составе неорганических частиц системы железо-кислород в составе био- наногибридного материала на основе бактериального ферритин-подобного белка Dps. Изученная проба была воспроизведена серией контрольных образцов, все данные были получены в одно время и в идентичных условиях, включая около трех недель нахождения в лабораторных условиях перед РФЭС измерениями. При этом сигнал, отличный от ожидаемого оксида  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (самых верхних слоев поверхности, в пределах глубины зондирования метода), надежно детектируется, что хорошо согласуется с синхротронными данными [12] и подтверждает

сложный, композитный состав неорганических наночастиц гибридного материала.

Приведенные выше результаты совокупности данных высокоразрешающих методов ПЭМ и РФЭС позволяют, наконец, утверждать, что путем вариации времени инкубации проб и концентрации солей – источников железа возможно управлять размером и составом неорганических наночастиц изученного био- наногибридного материала на основе бактериального ферритин-подобного белка Dps.

#### 4. Выводы

Впервые проведено совместное исследование био- наногибридного материала на основе бактериального ферритин-подобного белка Dps методами ПЭМ и РФЭС. В молекулярной культуре показана возможность формирования малых неорганических частиц идентичной формы и средним размером около 2 нм. Агломерации не наблюдаются. Полученные результаты демонстрируют сложный композитный состав неорганических частиц, включающий оксиды  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  системы железо-кислород, преимущественно близкие к  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Установлены включения металлического железа. Таким образом, представляется возможность регулировки свойств наноматериала путем вариации состава и режимов формирования. Это делает перспективным использование био- наногибридных структур на основе бактериального ферритин-подобного белка Dps для адресной доставки наночастиц, а также в современных технологиях при функционализации поверхностей, например, в спинтронике.

#### Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

#### Список литературы

1. Hikono T., Uraoka Y., Fuyuki T and Yamashita I. Novel method for making nanodot arrays using a cage-like protein. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2003;42: L398. <https://doi.org/10.1143/JJAP.42.L398>
2. Cai Y., Deng T., Pan Y., Zink J. I. Use of ferritin capped mesoporous silica nanoparticles for redox and pH triggered drug release *in vitro* and *in vivo*. *Advanced*

*functional materials*. 2020;30(39): 2002043. <https://doi.org/10.1002/adfm.202002043>

3. Harrison P. M., Arosio P. The ferritins, molecular properties, iron storage and cellular regulation. *Biochimica et Biophysica Acta*. 1996;1275(3): 161–203. [https://doi.org/10.1016/0005-2728\(96\)00022-9](https://doi.org/10.1016/0005-2728(96)00022-9)

4. Kim J. W., Choi S., Lillehei P. T. Electrochemically controlled reconstitution of immobilized ferritins for bioelectronics applications. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2006;601(1): 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2006.10.018>

5. Almiron M., Link A. J., Furlong D., Kolter R. A novel DNA-binding protein with regulatory and protective roles in starved *Escherichia coli*. *Genes & Development*. 1992;6: 2646–2654. <https://doi.org/10.1101/gad.6.12b.2646>

6. Ilari A., Ceci P., Ferrari D., Rossi G. L., Chiancone E. Iron incorporation into *Escherichia coli* Dps gives rise to a ferritin-like microcrystalline core. *The Journal of Biological Chemistry*. 2002;277(40): 37619–37623. <https://doi.org/10.1074/jbc.M206186200>

7. Dubrovin E. V., Dadinova L. A., Petoukhov M. V., Soshinskaya E. Yu., Mozhaev A. A., Klinov D. V., Schaffer T. E., Shtykova E. V., Batishchev O. V. Spatial organization of Dps and DNA–Dps complexes. *Journal of Molecular Biology*. 2021;433(10): 166930. <https://doi.org/10.1016/j.jmb.2021.166930>

8. Zhang Y., Fu J., Chee S. Y., Ang E. X., Orner B. P. Rational disruption of the oligomerization of the mini-ferritin *E. coli* DPS through protein–protein interface mutation. *Protein Science*. 2011;20(11): 1907–1917. <https://doi.org/10.1002/pro.731>

9. Бессонова Т. А., Шумейко С. А., Пуртов Ю. А., Антипов С. С., Преображенская Е. В., Тутукина М. Н., Озолина О. Н. Гексуронаты влияют на олигомерную форму структурного белка бактериального нуклеоида Dps и его способность связываться с линейными фрагментами ДНК. *Биофизика*. 2016;61(6): 1059–1067. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27808428>

10. Antipov S. S., Praslova N. V., Usoltseva D. S., Belikov E. A., Chuvenkova O. A., Artyukhov V. G., Turishchev S. Y., Preobrazhenskaya E. V., Ozoline O. N., Pichkur E. B., Presnyakov M. Y. High resolution cryogenic transmission electron microscopy study of *Escherichia coli* Dps protein: first direct observation in quasinative state. *Results in Physics*. 2018;11: 926–928. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.10.059>

11. Antipov S., Turishchev S., Purtov Yu., Shvyreva U., Sinelnikov A., Semov Yu., Preobrazhenskaya E., Berezhnoy A., Shusharina N., Novalokina N., Vakhitel V., Artyukhov V., Ozoline O. The oligomeric form of the *Escherichia coli* Dps 3 protein depends on the availability of iron ions. *Molecules*. 2017;22(11): 1904. <https://doi.org/10.3390/molecules22111904>

12. Turishchev S. Yu., Antipov S. S., Novolokina N. V., Chuvenkova O. A., Melekhov V. V., Ovsyannikov R., Senkovskii B. V., Timchenko A. A., Ozoline O. N., Domashevskaya E. P. A soft X-ray synchrotron study of the charge state of iron ions in the ferrihydrite core of the ferritin Dps protein in *Escherichia coli*. *Biophysics*. 2016;61(5): 705–710. <https://doi.org/10.1134/S0006350916050286>

13. Lebedev A. M., Menshikov K. A., Nazin V. G., Stankevich V. G., Tsetlin M. B., Chumakov R. G.. NanoPES photoelectron beamline of the Kurchatov Synchrotron Radiation Source. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2021;15(5): 1039–1044. <https://doi.org/10.1134/s1027451021050335>

14. Moulder J. F. et al *Handbook of X-ray photoelectron spectroscopy*. Chastain J. (ed). Minnesota: Perkin-Elmer Corporation Physical Electronics; 1992.

15. *Handbooks of Monochromatic XPS Spectra. Vol. 1: The Elements and Native Oxide*. XPS International, Inc.; 1999.

16. *NIST X-ray Photoelectron Spectroscopy Database*. Режим доступа: <https://srdata.nist.gov/xps/>

#### Информация об авторах

Парина Елена Владимировна, к. ф.-м. н., н. с. совместной лаборатории «Атомное и электронное строение функциональных материалов», Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-2817-3547>  
parinova@phys.vsu.ru

Антипов Сергей Сергеевич, д. б. н., доцент кафедры биофизики и биотехнологии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-3244-1428>  
ss.antipov@gmail.com

Беликов Евгений Александрович, инженер совместной лаборатории «Атомное и электронное строение функциональных материалов», Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-8336-2231>  
belikov@phys.vsu.ru

Чуvenkova Ольга Александровна, к. ф.-м. н., н. с. совместной лаборатории «Атомное и электронное строение функциональных материалов» Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-5701-6909>  
chuvenkova@phys.vsu.ru

Какулия Юлия Сергеевна, ведущий инженер кафедры общей физики, Воронежский государст-



венный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-0953-9024>  
kakuliia@phys.vsu.ru

*Кюода Дмитрий Анатольевич*, м. н. с. совместной лаборатории «Атомное и электронное строение функциональных материалов», Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-5635-0788>  
koyuda@phys.vsu.ru

*Требунских Сергей Юрьевич*, к. ф.-м. н., н. с. совместной лаборатории «Атомное и электронное строение функциональных материалов», Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-2481-2797>  
tsu@phys.vsu.ru

*Скоробогатов Матвей Сергеевич*, студент кафедры биофизики и биотехнологии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-9051-8174>  
mataska7111@gmail.com

*Чумаков Ратибор Григорьевич*, к. ф.-м. н., с. н. с. НИЦ «Курчатовский институт» (Москва, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-3737-5012>  
ratibor.chumakov@gmail.com

*Лебедев Алексей Михайлович*, к. ф.-м. н., с. н. с. НИЦ «Курчатовский институт» (Москва, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-9998-8941>  
lebedev.alex.m@gmail.com

*Синельников Александр Алексеевич*, к. ф.-м. н., директор центра коллективного пользования, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-0549-4615>  
tsu@phys.vsu.ru

*Артюхов Валерий Григорьевич*, д. б. н., профессор, заведующий кафедрой биофизики и биотехнологии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-5872-8382>

*Овчинников Олег Владимирович*, д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой оптики и спектроскопии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-6032-9295>  
ovchinnikov\_o\_v@rambler.ru

*Смирнов Михаил Сергеевич*, д. ф.-м. н., доцент, доцент кафедры оптики и спектроскопии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-8765-0986>  
smirnov\_m\_s@mail.ru

*Турицев Сергей Юрьевич*, д. ф.-м. н., доцент, заведующий кафедрой общей физики, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-3320-1979>  
tsu@phys.vsu.ru

*Поступила в редакцию 22.03.2022; одобрена после рецензирования 15.04.2022; принята к публикации 15.05.2022; опубликована онлайн 25.06.2022.*