

Научная статья
УДК 544.478
EDN: ZEGLVF
DOI: 10.21285/achb.1006



Использование микроорганизмов для извлечения металлов из водных объектов и создание на их основе катализаторов

О.А. Каманина✉, П.В. Рыбочкин, В.Н. Соромотин

Тульский государственный университет, Тула, Россия

Аннотация. Целью проведенного исследования являлась иллюстрация принципиальной возможности сорбции и удаления наночастиц палладия из водной среды с помощью клеток микроорганизмов *Paracoccus yeei* VKM B-3302. Важной особенностью исследования являлся анализ распределения наночастиц палладия по размерам в зависимости от способа хранения клеток микроорганизмов *Paracoccus yeei* VKM B-3302 после их выращивания. Установлено, что при использовании нативных (не подвергавшихся заморозке) микробных клеток средний диаметр образующихся наночастиц палладия составлял $3,99 \pm 0,03$ нм, в то время как для микроорганизмов, замороженных при температурах минус 4 и минус 20 °С, фиксировалось увеличение среднего диаметра наночастиц до $4,3 \pm 0,1$ и $4,5 \pm 0,6$ нм соответственно. Эти наблюдения подчеркивают важную роль жизнеспособности микробных клеток *Paracoccus yeei* VKM B-3302 в процессах формирования и стабилизации палладиевых наночастиц, а также в определении их размерных характеристик. Созданные биогибридные материалы проявляют выраженную каталитическую активность и могут эффективно использоваться в реакциях кросс-сочетания Мизороки – Хека, что подтверждает их высокую функциональную значимость. Предполагается, что удержание и стабилизация палладиевых наночастиц обеспечиваются комплексом химических взаимодействий, включающих амидные связи белков, карбоксильные и аминокислотные группы аминокислот, а также гликозидные связи полисахаридов, липидов и пептидогликана, входящих в состав клеточной оболочки. Эти компоненты создают многофункциональную матрицу, способствующую надежной фиксации и активности наночастиц.

Ключевые слова: катализаторы, бактерии, наночастицы металлов, биосинтез

Благодарности. Авторы выражают благодарность академику В.П. Ананикову за всестороннюю помощь в исследованиях, а также отдел структурных исследований Института органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН (г. Москва, Россия) за исследование образцов методом электронной микроскопии.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-73-10013, <https://rscf.ru/project/24-73-10013/>.

Для цитирования: Каманина О.А., Рыбочкин П.В., Соромотин В.Н. Использование микроорганизмов для извлечения металлов из водных объектов и создание на их основе катализаторов // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2025. Т. 15. N 4. С. 495–502. DOI: 10.21285/achb.1006. EDN:ZEGLVF.

PHYSICOCHEMICAL BIOLOGY

Original article

Use of microorganisms to recover metals from water bodies and create catalysts on their basis

Olga A. Kamanina✉, Pavel V. Rybochkin, Vitaly N. Soromotin

Tula State University, Tula, Russia

Abstract. The study aimed to demonstrate the sorption ability of *Paracoccus yeei* VKM B-3302 cells to remove palladium nanoparticles from aqueous media. An important feature of this study was the size distribution analysis

of palladium nanoparticles depending on the method used to store *Paracoccus yeei* VKM B-3302 cells after culture. The average diameter of palladium nanoparticles formed with the use of native (non-frozen) microbial cells was found to be equal to 3.99 ± 0.03 nm, whereas in the case of microorganisms frozen at temperatures of minus 4 °C and minus 20 °C, it increased to 4.3 ± 0.1 and 4.5 ± 0.6 nm, respectively. These observations highlight the important role of the viability of *Paracoccus yeei* VKM B-3302 cells in the formation and stabilization of palladium nanoparticles, as well as in the determination of their size characteristics. The produced biohybrid materials exhibit pronounced catalytic activity and can be effectively used in Mizoroki – Heck cross-coupling reactions, which confirms their high functional significance. It is assumed that the retention and stabilization of palladium nanoparticles are ensured by a complex of chemical interactions, including amide bonds in proteins and carboxyl and amino groups of amino acids, as well as glycosidic bonds in polysaccharides, lipids, and peptidoglycan, which are part of the cell envelope. These components create a multifunctional matrix that enables reliable fixation and activity of nanoparticles.

Keywords: catalysts, bacteria, metal nanoparticles, biosynthesis

Acknowledgements. The authors are grateful to Academician V.P. Ananikov for all-round assistance in research. Electron microscopy characterization was performed in the Department of Structural Studies of N.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry (Moscow, Russia).

Funding. The Russian Science Foundation supported this research, grant no. 24-73-10013 <https://rscf.ru/en/project/24-73-10013/>.

For citation: Kamanina O.A., Rybochkin P.V., Soromotin V.N. Use of microorganisms to recover metals from water bodies and create catalysts on their basis. Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2025;15(4): 495-502. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.1006. EDN: ZEGLVF.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях растущей экологической озабоченности и необходимости поиска эффективных методов очистки сточных вод применение микроорганизмов для аккумуляирования наночастиц металлов становится перспективным направлением исследований [1–4]. Этот подход не только обеспечивает эффективную очистку сточных вод от наночастиц металлов, но и открывает новые возможности для их дальнейшего использования. Микроорганизмы обладают способностью поглощать и накапливать различные вещества, включая наночастицы металлов [1, 3, 5–7]. Этот процесс может быть усилен путем оптимизации условий культивирования микроорганизмов, таких как температура, pH, концентрация питательных веществ и присутствие металлов. С одной стороны, микроорганизмы способны поглощать большое количество наночастиц металлов, и это позволяет эффективно очищать сточные воды без применения химических реагентов, что важно для экологии, с другой стороны, поглощенные микроорганизмами наночастицы металлов могут быть отделены и использованы в различных областях, например, в сельском хозяйстве и промышленности. Таким образом, в качестве преимуществ применения микроорганизмов для аккумуляирования наночастиц металлов из сточных вод можно отметить эффективность очистки, экологическую безопасность и возможность дальнейшего использования. Метод использования микроорганизмов для аккумуляирования наночастиц металлов из сточных вод является перспективным направлением исследований. Дальнейшие исследования в этой области могут привести к разработке новых эффективных методов очистки сточных вод и созданию новых материалов с улучшенными свойствами.

Ранее нашим научным коллективом было показано [6, 7], что возможно формирование наночастиц палладия при использовании клеток микроорганизмов *Paracoccus yeei* VKM B-3302, выделенных из сточных вод предприятий Тульской области. При этом

отмечено [7], что клетки микроорганизмов должны быть жизнеспособными: повреждение цитоплазматической мембраны ведет к неэффективному формированию наночастиц и их укрупнению по сравнению с использованием нативных микроорганизмов.

То же время, несмотря на перспективность метода, могут существовать некоторые ограничения по хранению микроорганизмов после наработки для достижения максимальной эффективности получения наноразмерных форм палладия. В связи с этим в данном исследовании оценили возможность применения клеток микроорганизмов для удаления наночастиц палладия из водной среды, а также влияние условий хранения биомассы на размер наночастиц и каталитические свойства полученных биогибридных материалов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Культивирование бактерий *Paracoccus yeei* VKM B-3302. Культивирование бактерий *P. yeei* VKM B-3302 осуществляли на питательной среде Lysogeny broth (LB) следующего состава, г/л: пептон – 10; NaCl – 10; дрожжевой экстракт – 5. Культуру бактерий выращивали в колбах Эрленмейера объемом 750 см³ (объем питательной среды – 200 см³) при 28 °C и перемешивании на шейкере-инкубаторе Bios BSI-2 (Bios, Китай) с частотой вращения 180 об/мин. Через 36 ч культивирования клетки собирали центрифугированием (8000 об/мин, 10 мин, центрифуга MWP-351R (MPW Med. Instruments, Польша)) в предварительно взвешенные микропробирки типа «Эппендорф». Сливали надосадочную жидкость. Биомассу клеток либо использовали сразу, либо хранили при температуре минус 4 и минус 20 °C.

Сорбция металла из модельного раствора. Биомассу клеток помещали в модельный раствор, содержащий соль палладия в соотношении массы палладия к массе клеток, равном 5:95 (рис. 1), для получения с учетом последующей потери массы клетками при сушке катализатора 5 масс.% палладия. Сосуд закрывали резиновой пробкой и перемешивали в течение 10 мин

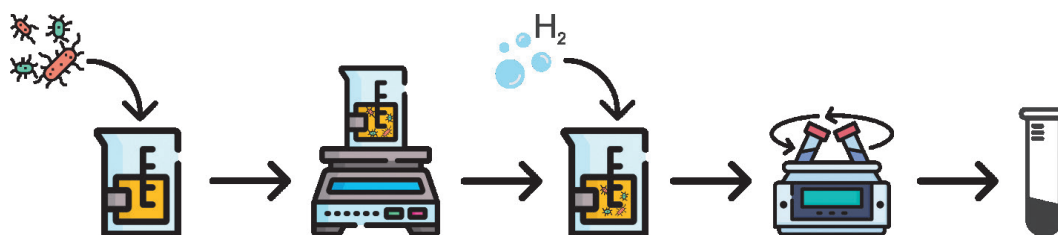


Рис. 1. Модельный процесс сорбции палладия на клетках микроорганизмов и получение катализатора Pd / *Paracoccus yeii*
Fig. 1. Model process of palladium sorption on microbial cells and preparation of Pd / *Paracoccus yeii* catalyst

(180 об/мин; 28 °C). Далее, используя генератор водорода ГВ-12 (НПФ «Мета-Хром», Россия), подавали через смесь водород (0,53 мл/мин) в течение 2 мин. Биомассу клеток с наночастицами палладия собирали центрифугированием (12000 об/мин, 10 мин, центрифуга ВКС-ТН16D (Biobase, Китай)) в микропробирки типа «Эппендорф». Надосадочную жидкость сливали, осадок катализатора Pd / *P. yeii* оставляли на сушку при комнатной температуре на 48 ч.

Приготовление срезов. Образец фиксировали в 2%-м растворе глутарового альдегида в 0,05 М какодилатном буфере (pH 7,2) в течение 1 ч при 4 °C. После образец трижды промывали 0,05 М какодилатным буфером (pH 7,2). Далее формировали агаровые блоки с образцами катализатора: агар использовали как среду, которая ограничивает подвижность микроорганизмов и позволяет создать условия для исследования. Для этого смешивали образец с раствором 2%-го агара (50 °C) и наносили на покровное стекло до застывания. Обезвоженный образец в агаровых блоках покрывали эпоксидной смолой Epon 812 и резали с помощью ультрамикротомы Reichert-Jung Ultracut E (Reichert-Jung, Германия). Срезы помещали на медные решетки для просвечивающей электронной микроскопии.

Просвечивающая электронная микроскопия срезов Pd / *Paracoccus yeii* и обработка полученных изображений. Срезы изучали на просвечивающем электронном микроскопе Hitachi HT7700 (Hitachi, Япония). Изображения получали в режиме ярко-полевой просвечивающей электронной микроскопии при ускоряющем напряжении 100 кВ. Распределение наночастиц по размерам определяли с помощью программы ImageJ PRO и облачного сервиса DLgram для анализа микроскопических изображений [8].

Обнаружение наночастиц проводили с помощью библиотеки OpenCV [9] в два этапа: получение карты примерного расположения наночастиц и последующий поиск контуров наночастиц с фильтрацией по размеру. Для первого этапа были применены следующие операции:

1. Адаптивное пороговое выделение с использованием гауссова адаптивного метода для расчета

порогового значения. Размер блока был равен 41, а константа *C* равнялась 7 для изображений с увеличением 100000 и более и 12 для изображений с увеличением 20000 или 50000. Этот метод бинаризации был выбран из-за лучших результатов для изображений с переменной освещенностью и высокой контрастностью.

2. Морфологические преобразования: расширение с ядром (5, 5) и эрозия с ядром (3, 3) для уменьшения шума в бинаризованном изображении.

3. Медианный фильтр размытия с ядром (5, 5) для дополнительного сглаживания изображения.

Бинаризация изображений с разным увеличением была реализована разными способами. Если изображение имело увеличение 100000 раз и более, то метод применяли ко всему изображению. В противном случае при увеличении 20000 или 50000 раз процедуру проводили для каждого из 8 участков изображения, предварительно увеличенного в 3 раза с помощью бикубической интерполяции.

Вторым шагом была реализация поиска контуров. Для каждого контура находили выпуклый корпус, и если площадь контура составляла менее 70% от его площади, то соответствующий контур заменялся выпуклым корпусом.

Затем для каждого контура находили минимальный объемлющий круг, диаметр в нанометрах и координаты центра. Эта информация использовалась для фильтрации контуров по линейному размеру. Результатом данного этапа являются два массива: массив контуров и массив наночастиц, содержащий данные о расположении и размере наночастиц.

Было проведено обнаружение наночастиц на клетках и в окружающем растворе. Для этого была проведена сегментация клеток с помощью алгоритма Cellpose3 [9] (модель cyto3). Затем полученные маски сегментации использовались для определения наночастиц на клетках и свободных наночастиц: центр наночастицы проверялся на принадлежность к области с клетками.

Модельные реакции Мизороки – Хека и Сузуки – Мияуры. Модельной реакцией выбрана реакция Мизороки – Хека – арилирование стирола

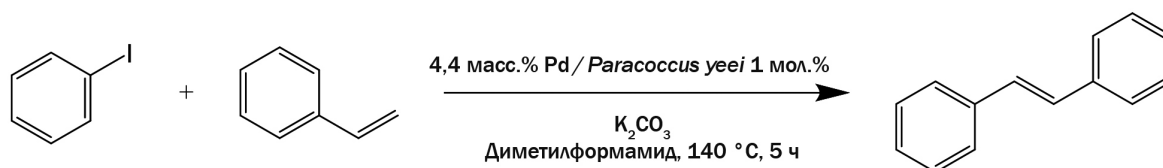


Рис. 2. Условия реакции Мизороки – Хека

Fig. 2. Conditions of Mizoroki – Heck reaction

йодбензолом в диметилформамиде, в качестве основания использовали карбонат калия (рис. 2).

Навески веществ помещали в пробирки: карбонат калия – 0,6 ммоль (1,2 экв.); Pd / *P. yeai* – 0,005 ммоль (1 мол.%). Добавляли в качестве растворителя 5 см³ диметилформамида. Добавляли жидкие реагенты: йодбензол – 0,5 ммоль (1 экв.), стирол – 0,6 ммоль (1,2 экв.). Выходы *транс*-стильбена определяли с помощью газовой хроматографии.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для оценки эффективной сорбции и восстановления до наночастиц палладия использовали клетки микроорганизмов, которые были выращены на богатой питательной среде без хранения и при хранении при минус 4 и минус 20 °С. Было высказано предположение, что незначительное разрушение цитоплазматической мембраны при заморозке, с одной стороны, может способствовать лучшему проникновению палладия, но, с другой стороны, оказывает значительное негативное влияние на жизнеспособность клеток, существенно снижая ее. Кроме того, процесс заморозки – разморозки является значительным стрессом для клеток микроорганизмов. Некоторые внутриклеточные белки плохо переносят подобные воздействия, что дополнительно снижает метаболическую активность внутри клеток.

В связи с этим для сорбции наночастиц палладия клетками микроорганизмов из водной среды были использованы бактерии *P. yeai* сразу после культивирования и двух видов заморозки после минус 4 и минус 20 °С. Сорбцию металла проводили в соответствии с приведенным выше описанием. Методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой показано,

что сорбция палладия при использовании бактерии *P. yeai* составляет 4,4 масс.%, что важно учитывать при дальнейшем использовании получившегося биогибридного материала Pd / *P. yeai* в химических реакциях.

Изучение срезов биогибридного материала Pd / *Paracoccus yeai*. Ультратонкие срезы биогибридного материала Pd / *P. yeai*, приготовленного из микроорганизмов, свежесвыращенных и выдержанных при минус 4 и минус 20 °С, изучали при помощи просвечивающей электронной микроскопии (рис. 3). Обработку микрофотографий провели с помощью нейросетей [8], что позволило оценить размер наночастиц палладия и построить их распределение по размерам.

На полученных при помощи просвечивающей электронной микроскопии изображениях клетки бактерий *P. yeai* представляют собой объекты серого цвета (при малой толщине среза – светло-серого) с формой неправильного круга диаметром около 0,5–1,0 мкм. Наночастицы палладия имеют вид серых или черных включений, обладающих сферической формой. Отмечается увеличение размера наночастиц Pd для биогибридного материала Pd / *P. yeai*, приготовленного из свежесвыращенных клеток и после выдерживания при минус 20 °С. Использование бактерий без заморозки дает узкое распределение наночастиц палладия по размерам со средним диаметром 3,99±0,01 нм (см. рис. 3, d), при этом на замороженных микроорганизмах наблюдается расширение размера наночастиц палладия (см. рис. 3, e, f) со средним размером при минус 4 и минус 20 °С 4,3±0,1 и 4,5±0,6 нм соответственно.

Pd / Paracoccus yeai в реакциях Мизороки – Хека. Учитывая размеры наночастиц палладия и их распределение по бактерии, биогибридный материал

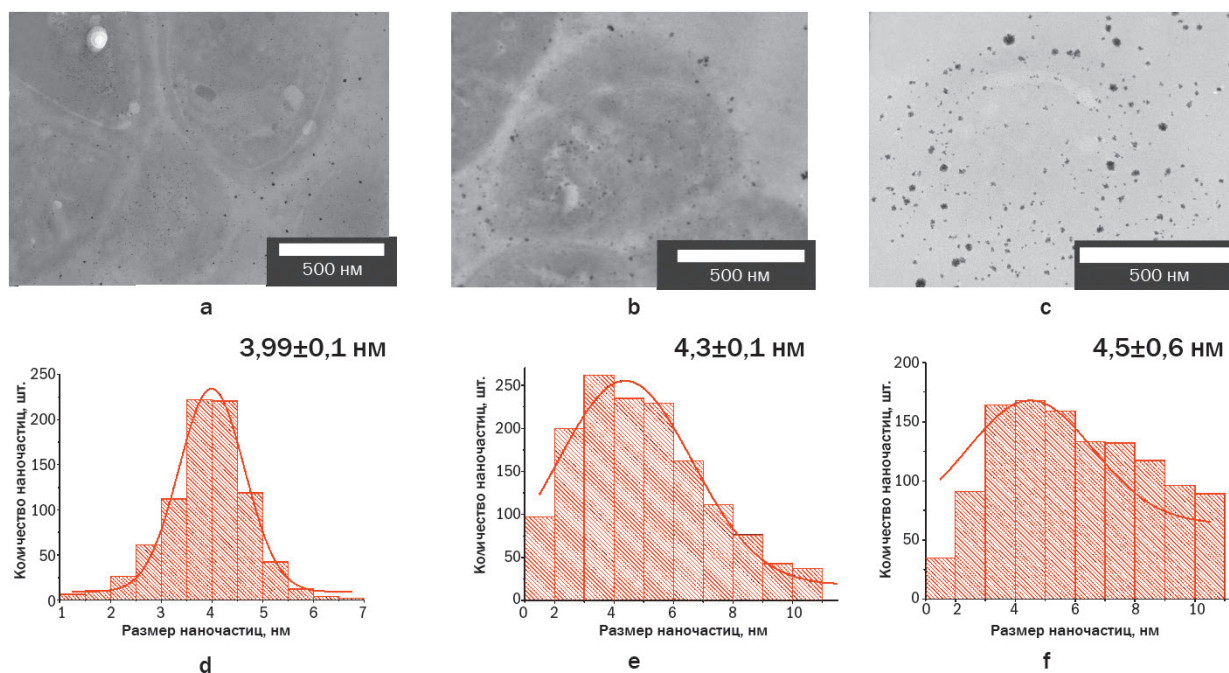


Рис. 3. Полученные при помощи просвечивающей электронной микроскопии изображения наночастиц палладия и их распределение по размерам в биогибридном материале Pd / *Paracoccus yeai*, приготовленном из клеток бактерий: а–d – без заморозки; b–e – после заморозки при минус 4 °С; c–f – после заморозки при минус 20 °С

Fig. 3. Scanning electron microscopy images and size distributions of palladium nanoparticles in Pd / *Paracoccus yeai* biogibridged material prepared from bacterial cells: a–d – without freezing; b–e – after freezing at -4 °C; c–f – after freezing at -20 °C

Pd / *P. yeii* можно назвать катализатором, а оценку его каталитической активности провести на модельных реакциях кросс-сочетания Мизороки – Хека (см. рис. 2).

Выход продукта реакции при использовании клеток без заморозки составил 97%, в случае катализаторов, приготовленных из замороженных клеток при минус 4 и минус 20 °С, составил 91 и 67% соответственно (рис. 4). Такое снижение активности катализатора Pd / *P. yeii* можно объяснить увеличением среднего размера формируемых бактериями наночастиц палладия [10, 11], что хорошо видно из рис. 3. Следовательно, целостность мембраны и внутренних структур клетки необходима для эффективного формирования и стабилизации наночастиц палладия, что, в свою очередь, оказывает существенное влияние на активность катализатора в реакции кросс-сочетания.

Рамановский анализ и анализ, выполненный методом инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье. Бактериальные клетки содержат множество биомолекул, включая белки, нуклеиновые кислоты, углеводы и липиды, которые присутствуют на поверхности клетки и в цитоплазме. Данные биомолекулы могут связываться с металлическими наночастицами и выступать в роли агентов, которые препятствуют их агрегации. Это особенно важно для катализа, в частности, для реакций кросс-сочетания [12–14] и гидрирования [15–17]. Для определения биологических компонентов, участвующих в стабилизации наночастиц палладия, использовали спектры комбинационного рассеяния, а также инфракрасную спектроскопию с преобразованием Фурье (FTIR) катализатора Pd / *P. yeii* (бактерии без заморозки) и свободных от палладия клеток *P. yeii* (рис. 5).

На рамановском спектре ацетата палладия (см. рис. 5, а) пики в районе 270 и 430 см⁻¹ характеризует связь Pd-O, пик 630 см⁻¹ отвечает за связи в ацетате.

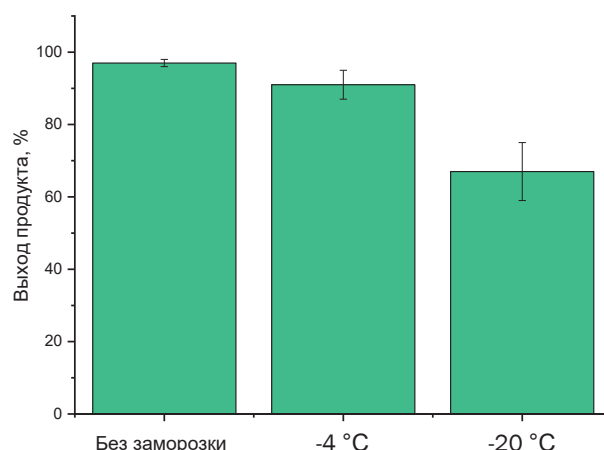


Рис. 4. Выход продукта реакции транс-стильбена Мизороки – Хека с катализаторами Pd / *Paracoccus yeii*, приготовленного с использованием микроорганизмов при разных условиях хранения

Fig. 4. Yield of the product of the reaction of *trans*-stilbene Mizoroki – Heck with Pd / *Paracoccus yeii* catalysts, which was prepared using microorganisms under different storage conditions

Спектр бактерий *P. yeii* (см. рис. 5, а) – это типичный спектр живой клетки, где присутствуют пики цитохромов (747, 1127, 1305, 1586 см⁻¹), липидов и белков (2940, 1665, 1450 см⁻¹), нуклеиновых кислот (780 см⁻¹), а также пики каротиноидов с высокой интенсивностью: 1004, 1157 и 1530 см⁻¹. Спектр катализатора Pd / *P. yeii* менее интенсивный по сравнению с другими спектрами из-за морфологии образца. На спектре присутствуют пики каротиноидов (1000, 1154 и 1530 см⁻¹) и цитохромов (746, 1586 см⁻¹), однако на этом спектре отсутствуют пики: 890 см⁻¹ – уксусной кислоты, 630 см⁻¹ – ацетата

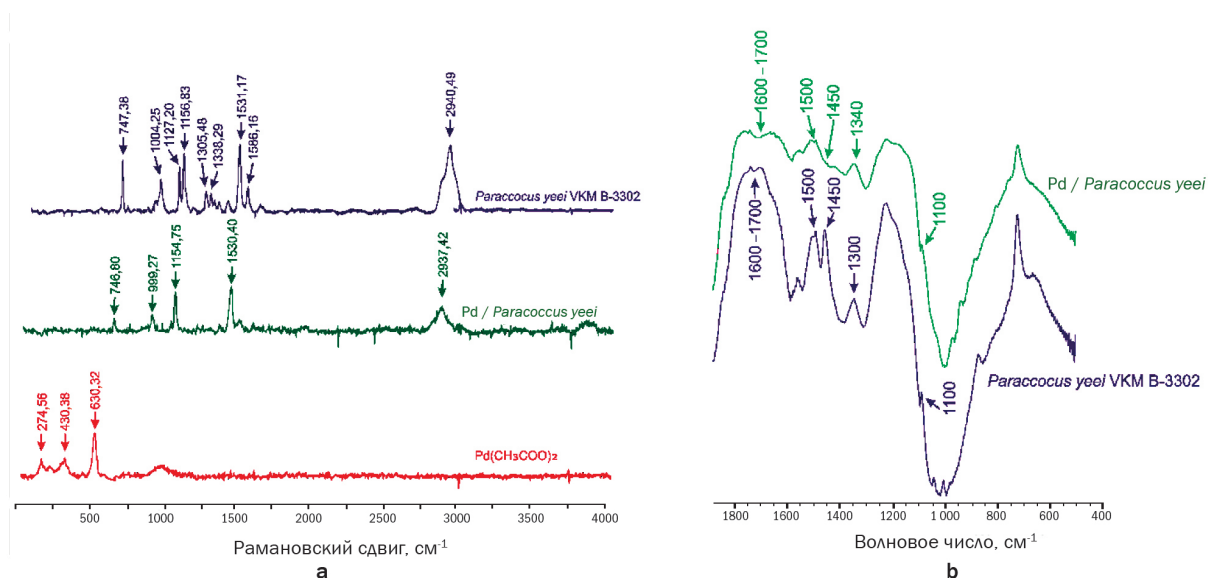


Рис. 5. Спектры комбинационного рассеяния, полученные из бактерий *Paracoccus yeii*, Pd / *Paracoccus yeii* и Pd(CH₃COO)₂ (а) и полученные при помощи инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье с использованием KBr спектры Pd / *Paracoccus yeii* и клеток *Paracoccus yeii* (б) (графики смещены для наглядности)

Fig. 5. Raman spectra obtained from *Paracoccus yeii*, Pd / *Paracoccus yeii* and Pd(CH₃COO)₂ bacteria (а) and FTIR (KBr) spectra of Pd / *Paracoccus yeii* and *Paracoccus yeii* cells (б) (graphs are shifted for clarity)

палладия. Снижение интенсивности спектра катализатора Pd / P. yeei в совокупности с исчезновением пика ацетата палладия может говорить о реакции палладия и компонентов клеток. Возможно, поэтому исчезает пик Pd-O (630 см^{-1}) и снижается интенсивность пиков от компонентов клетки: белков, липидов ($2940, 1665, 1450\text{ см}^{-1}$), нуклеиновых кислот (780 см^{-1}). Сравнительный анализ спектров инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье чистой культуры клеток микроорганизмов P. yeei BKM В-3302 и Pd / P. yeei выявил некоторые различия (см. рис. 5, b). Так, наблюдалось ослабление в области 1100 см^{-1} , которая относится к связям C-O-P и P-O-P; в областях 1300 см^{-1} и $1450\text{--}1500\text{ см}^{-1}$, которые относятся к амидным связям в структуре белков C-N и N-H; в области $1600\text{--}1700\text{ см}^{-1}$, которая относится к амидным связям C=O в белках и C=O карбоксильных групп в белках. Кроме того, изменения наблюдались в области 1050 см^{-1} , которая приписывается связям C-O и C-O-C полисахаридов [18]. Данные инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье показывают, что наночастицы палладия взаимодействуют с кислородом или азотом через пептидную связь белков и атом кислорода полисахаридов (гликозидная связь) или атом кислорода карбоксильной группы белковых молекул. Эти биомолекулы играют роль в стабилизации наночастиц палладия, влияют на их морфологию и каталитическую активность в реакциях гидрирования. Считается, что микроорганизмы могут стабилизировать металлические наночастицы с помощью различных компонентов клеток. В работе [19] показана возможность формирования

комплекса палладия с нуклеотидами ДНК. Белки, богатые цистеином и триптофаном, предотвращают агрегацию наночастиц [12]. Также проиллюстрировано, что бактериальные липополисахариды и белки S-слоя формируют наночастицы в матрицу [20]. В данном исследовании показано, что наночастицы палладия могут быть стабилизированы амидными связями белков, карбоксильными группами и аминогруппами радикалов аминокислот, а также гликозидными связями полисахаридов, липидов и пептидогликана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе продемонстрирована принципиальная возможность использования микроорганизмов для удаления наночастиц металлов из сточных вод. Анализ распределения наночастиц палладия по размерам показал, что использование клеток без заморозки позволяет получить наночастицы палладия со средним диаметром $3,99\pm 0,03\text{ нм}$. При использовании замороженных клеток при температурах минус 4 и минус $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ средний диаметр наночастиц составил $4,3\pm 0,1$ и $4,5\pm 0,6\text{ нм}$ соответственно. Показано, что полученный катализатор на основе клеток микроорганизмов без заморозки возможно использовать в реакциях кросс-сочетания, а наночастицы палладия могут быть стабилизированы амидными связями белков, карбоксильными группами и аминогруппами радикалов аминокислот, а также гликозидными связями полисахаридов, липидов и пептидогликана.

REFERENCES

1. Kapoor R.T., Salvadori M.R., Rafatullah M., Sidiqui M.R., Khan M.A., Alshareef S.A. Exploration of microbial factories for synthesis of nanoparticles – a sustainable approach for bioremediation of environmental contaminants. *Frontiers in Microbiology*. 2021;12:658294. DOI: 10.3389/fmicb.2021.658294.
2. Olawade D.B., Wada O.Z., Fapohunda O., Egbewole B.I., Ajisafe O., Ige A.O. Nanoparticles for microbial control in water: mechanisms, applications, and ecological implications. *Frontiers in Nanotechnology*. 2024;6:1427843. DOI: 10.3389/fnano.2024.1427843.
3. Yamini V., Devi Rajeswari V. Effective bio-mediated nanoparticles for bioremediation of toxic metal ions from wastewater – a review. *Journal of Environmental Nanotechnology*. 2023;12(2):12-33. DOI: 10.13074/jent.2023.06.232467.
4. Nuzzo A., Hosseinkhani B., Boon N., Zanaroli G., Fava F. Impact of bio-palladium nanoparticles (bio-Pd NPs) on the activity and structure of a marine microbial community. *Environmental Pollution*. 2017;220:1068-1078. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.11.036.
5. Kimber R.L., Lewis E.A., Parmeggiani F., Smith K., Bagshaw H., Gianolio D., et al. Biosynthesis and characterization of copper nanoparticles using *Shewanella oneidensis*: application for click chemistry. *Small*. 2018;14(10):1703145. DOI: 10.1002/smll.201703145.
6. Gomez-Bolivar J., Mikheenko I.P., Macaskie L.E., Merroun M.L. Characterization of palladium nanoparticles produced by healthy and microwave-injured cells of *Desulfovibrio desulfuricans* and *Escherichia coli*. *Nanomaterials*. 2019;9(6):857. DOI: 10.3390/nano9060857.
7. Mandeep, Shukla P. Microbial nanotechnology for bioremediation of industrial wastewater. *Frontiers in Microbiology*. 2020;11:590631. DOI: 10.3389/fmicb.2020.590631.
8. Bradski G. The OpenCV library. *Doctor Dobbs Journal*. 2000;25(11).
9. Stringer C., Pachitariu M. Cellpose3: one-click image restoration for improved cellular segmentation. *Nature Methods*. 2025;22(3):592-599. DOI: 10.1038/s41592-025-02595-5.
10. Chatterjee S., Bhattacharya S.K. Size-dependent catalytic activity and fate of palladium nanoparticles in Suzuki – Miyaura coupling reactions. *ACS Omega*. 2018;3(10):12905-12913. DOI: 10.1021/acsomega.8b01598.
11. Adams C.P., Walker K.A., Obare S.O., Docherty K.M. Size-dependent antimicrobial effects of novel palladium nanoparticles. *PLoS One*. 2014;9(1):e85981. DOI: 10.1371/journal.pone.0085981.
12. Deplanche K., Bennett J.A., Mikheenko I.P., Omajali J., Wells A.S., Meadows R.E., et al. Catalytic activity of bio-mass-supported Pd nanoparticles: influence of the biological component in catalytic efficacy and potential application in 'green' synthesis of fine chemicals and pharmaceuticals. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2014;147:651-665. DOI: 10.1016/j.apcatb.2013.09.045.
13. Ariannezhad M., Pourmorteza N., Yousefi A., Esperi M. Catalytic reduction of nitroarenes and Suzuki – Miyaura reactions using Pd complex stabilized on the functionalized polymeric support. *Chemical Physics Letters*. 2022;793:139431. DOI: 10.1016/j.cpllett.2022.139431.
14. Li Y., Yue-Su M.S., Zhang H.-Y., Zhang Y., Dong-Han M.S., Han Y.-P., et al. Synthesis of tetracyclic

indolines through palladium-catalyzed asymmetric dearomative reaction of aryl iodides. *ChemistrySelect*. 2021;6(19):4719-4724. DOI: 10.1002/slct.202101238.

15. Egan-Morriss C., Kimber R.L., Powell N.A., Lloyd J.R. Biotechnological synthesis of Pd-based nanoparticle catalysts. *Nanoscale Advances*. 2022;4(3):654-679. DOI: 10.1039/d1na00686j.

16. Law C.K.Y., Bonin L., De Gusseme B., Boon N., Kundu K. Biogenic synthesis of palladium nanoparticles: new production methods and applications. *Nanotechnology Reviews*. 2022;11(1):3104-3124. DOI: 10.1515/ntrev-2022-0482.

17. Macaskie L.E., Collins J., Mikheenko I.P., Gomez-Bolivar J., Merroun M.L., Bennett J.A. Enhanced hydrogenation catalyst synthesized by *Desulfovibrio desulfuricans* exposed

to a radio frequency magnetic field. *Microbial Biotechnology*. 2021;14(5):2041-2058. DOI: 10.1111/1751-7915.13878.

18. Schmitt J., Flemming H.-C. FTIR-spectroscopy in microbial and material analysis. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 1998;41(1):1-11. DOI: 10.1016/S0964-8305(98)80002-4.

19. Mart M. The effect of the DNA support on Pd/DNA catalyzed organic transformations. *Catalysis Science & Technology*. 2024;14(13):3580-3588. DOI: 10.1039/D4CY00546E.

20. Omajali J.B., Mikheenko I.P., Merroun M.L., Wood J., Macaskie L.E. Characterization of intracellular palladium nanoparticles synthesized by *Desulfovibrio desulfuricans* and *Bacillus benzeovorans*. *Journal of Nanoparticle Research*. 2015;17:264. DOI: 10.1007/s11051-015-3067-5.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каманина Ольга Александровна,
кандидат химических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
Тульский государственный университет,
300012, г. Тула, пр. Ленина, 92,
Российская Федерация,
✉ o.a.kamanina@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4187-4666>

Рыбочкин Павел Владимирович,
младший научный сотрудник,
Тульский государственный университет,
300012, г. Тула, пр. Ленина, 92,
Российская Федерация,
rybochkin.pavel.vl@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1031-7752>

Соромотин Виталий Николаевич,
кандидат химических наук,
старший научный сотрудник,
Тульский государственный университет,
300012, г. Тула, пр. Ленина, 92,
Российская Федерация,
kilativ90@yandex.com
<https://orcid.org/0000-0002-6236-1966>

Вклад авторов

О.А. Каманина – разработка концепции, получение финансирования, административное руководство исследовательским проектом, научное руководство, визуализация, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.
П.В. Рыбочкин – разработка методологии, курирование данных, формальный анализ, проведение исследования, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.
В.Н. Соромотин – разработка концепции, разработка методологии, формальный анализ, проведение исследования, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Olga A. Kamanina,
Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor,
Leading Researcher,
Tula State University,
92, Lenin Ave., Tula, 300012,
Russian Federation,
✉ o.a.kamanina@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4187-4666>

Pavel V. Rybochkin,
Junior Researcher,
Tula State University,
92, Lenin Ave., Tula, 300012,
Russian Federation,
rybochkin.pavel.vl@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1031-7752>

Vitaly N. Soromotin,
Cand. Sci. (Chemistry), Senior Researcher,
Tula State University,
92, Lenin Ave., Tula, 300012,
Russian Federation,
kilativ90@yandex.com
<https://orcid.org/0000-0002-6236-1966>

Contribution of the authors

Olga A. Kamanina – conceptualization, funding acquisition, project administration, supervision, visualization, writing – original draft, editing.
Pavel V. Rybochkin – methodology, data curation, formal analysis, investigation, writing – original draft, editing.
Vitaly N. Soromotin – conceptualization, methodology, formal analysis, investigation, writing – original draft, editing.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Поступила в редакцию 31.03.2025
Одобрена после рецензирования 30.05.2025
Принята к публикации 17.11.2025.

Information about the article

The article was submitted 31.03.2025
Approved after reviewing 30.05.2025
Accepted for publication 17.11.2025.