

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 573.6: 678

БИОКАТАЛИЗ В ДЕГРАДАЦИИ СИНТЕТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ

Ольга Васильевна Маслова¹, Ольга Витальевна Сенько², Николай Алексеевич Степанов³, Илья Владимирович Лягин⁴, Елена Николаевна Ефременко⁵

¹⁻⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
химический факультет

²⁻⁵ Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук

Авторы, ответственные за переписку: Ольга Васильевна Маслова, olga.maslova.rabota@gmail.com; Елена Николаевна Ефременко, elena_efremenko@list.ru

Аннотация. Отходы производства и применения синтетических полимеров представляют собой серьезную проблему. Разработка ферментных и микробных биокатализаторов, осуществляющих деградацию труднорастворимых полимеров, представляется одним из перспективных и экологически ориентированных вариантов решения этой проблемы. Возможность комбинирования биокатализаторов (ферментов, клеток микроорганизмов) с металлическими катализаторами рассматривается как перспективная основа для разработки новых гибридных химико-биокаталитических процессов, предназначенных для эффективной деградации синтетических полимеров.

Ключевые слова: биокатализаторы, микроорганизмы, ферменты, консорциумы, металлические катализаторы, гибридные каталитические процессы

DOI: 10.55959/MSU0579-9384-2-2024-65-2-161-168

Список сокращений: БК – биокатализаторы, СП – синтетические полимеры, СД – степень деградации, СВП – снижение веса полимера, MeK – металлические катализаторы, ПЭТаза – полиэтилентерефталатгидролаза.

Финансирование. Сбор и анализ литературных источников по ферментативным и микробным биокатализаторам деструкции синтетических полимеров выполнен в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова № 121041500039-8. Сбор и анализ данных по разработке гибридных каталитических процессов, направленных на деструкцию синтетических полимеров выполнен в рамках государственного задания ИБХФ РАН тема № 44.2.

Для цитирования: Маслова О.В., Сенько О.В., Степанов Н.А., Лягин И.В., Ефременко Е.Н. Биокатализ в деградации синтетических полимеров // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2024. Т. 65. № 2. С. 161–168.

SCIENTIFIC REVIEW

BIOCATALYSIS IN DEGRADATION OF SYNTHETIC POLYMERS

Olga V. Maslova¹, Olga V. Senko², Nikolay N. Stepanov³, Ilya V. Lyagin⁴,
Elena N. Efremenko⁵

¹⁻⁵ Department of Chemistry, Lomonosov Moscow State University

²⁻⁵ Emmanuel Institute of Biochemical Physics of the Russian Academy of Sciences

Authors for correspondence: Olga V. Maslova, olga.maslova.rabota@gmail.com;
Elena N. Efremenko, elena_efremenko@list.ru

Abstract. Waste from the production and use of synthetic polymers is a serious problem. The development and application of enzymatic and microbial biocatalysts capable of degrading hard-to-decompose polymers seems to be one of the promising and environmentally oriented solutions to this problem. The possibilities of combining biocatalysts (enzymes, microbial cells) with metal catalysts are considered as a perspective basis for the development of new hybrid chemical-biocatalytic processes designed for the effective degradation of synthetic polymers.

Keywords: biocatalysts, enzymes, microorganisms, consortia, metal catalysts, hybrid catalytic processes

List of abbreviations: BC – biocatalysts, SP – synthetic polymers, DD – degree of degradation, WLP – weight loss of polymer, MeC – metal catalysts, PETasa – polyethylene terephthalate hydrolase.

Financial Support. The collection and analysis of literature sources on enzymatic and microbial biocatalysts used for the destruction of synthetic polymers was carried out within the framework of the state task of Lomonosov Moscow State University No. 121041500039-8. The collection and analysis of data on the development of hybrid catalytic processes aimed at the destruction of synthetic polymers was carried out within the framework of the state task of the IBCF RAS topic No. 44.2.

For citation: Maslova O.V., Senko O.V., Stepanov N.A., Luagin I.V., Efremenko E.N. Biocatalysis in degradation of synthetic polymers // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 2. Chemistry. 2024. T. 65. № 2. S. 161–168.

В настоящее время мировой рынок синтетических полимеров (СП) составляет порядка 450 млн т [1]. Столь значительный объем производства приводит к необходимости исследования полного «жизненного цикла» СП, включающего не только синтез, но и пути их деградации [2, 3]. Среди эффективных катализаторов деградации СП рассматриваются как отдельные ферменты, так и ферментные комплексы, целые клетки, продуцирующие природные или рекомбинантные оксидоредуктазы и гидролазы, а также природные и искусственные консорциумы микроорганизмов, функционирование которых может обеспечить полную деградацию СП [4, 5]. Потребность в поиске биокатализаторов (БК), способных осуществлять высокоэффективную деградацию СП, обусловлена также

тем, что СП имеют продолжительный период разложения в условиях окружающей среды, который для полиэфиров составляет 3,3 года, для поликарбонатов и полиуретанов – 42 000 лет, а для полиамидов – 83 000 лет [6]. Применение именно БК для деградации СП выглядит наиболее предпочтительным с экологической точки зрения, в том числе в условиях окружающей среды [7, 8].

Для улучшения показателей деградации СП все активнее исследуются возможности применения гибридных химико-биокаталитических процессов, которые включают в себя предварительную физико-химическую обработку СП с их деградацией до промежуточных соединений и последующую их биокаталитическую трансформацию в конечные продукты деградации [5, 9]. При этом изучается

комбинирование физико-химической обработки СП с введением в реакционные среды различных металлических катализаторов (MeK) [3], способных обеспечивать подготовку СП к глубокой биокаталитической деструкции. Поскольку аналогичные успешные комбинированные решения уже известны для ряда подобных гибридных химико-биокаталитических процессов [10–12], то и комбинированная каталитическая деградация СП активно исследуется в последнее время [13–18].

Целью настоящего мини-обзора является краткий критический анализ современных научных достижений, отражающий основные направления исследований в области биокаталитической деградации различных СП, их преимуществ и существующих ограничений, стимулирующих поиск новых научных решений.

Основная часть

Установлено, что гидролазы и оксидоредуктазы способны осуществлять деструкцию различных СП (таблица), которые имеют разный химический состав и химическое строение (линейные, разветвленные, сшитые) [19].

В условиях многих природных сред процесс деградации СП начинается с реакций окисления, в которых активное участие принимают различные оксидазы [53]. Поскольку для многих из таких реакций требуется наличие в среде кофакторов для БК или дополнительного субстрата (например, H_2O_2 [41, 42]), то не только химическая природа СП является важным фактором, предопределяющим возможность биокатализа с участием определенных ферментов и клеток, но и наличие необходимых дополнительных условий.

Эффективность биокаталитического гидролиза СП во многом определяется способностью ферментов связываться с полимерным субстратом, в этой связи белковый дизайн и направленный мутагенез [20, 21, 31], затрагивающий функциональные группы не только в активном центре ферментов, но и в субстрат-связывающем домене, активно используются в разработке высокоактивных БК [54].

По аналогии с природными полимерами, в ряде случаев комплексы ферментов способны обеспечить более эффективную деструкцию СП, чем единичные ферменты [14, 15, 18]. Подбор ферментов для таких комплексов, как и получение их в результате направленного биосинтеза природными или сконструированными рекомбинантными микробными продуцентами, является одним из современных трендов в разработке БК для деградации СП [3, 20, 21].

В настоящее время наиболее хорошо изучены только ферменты, катализирующие деградацию полиэтилентерефталата [3, 55], тогда как для многих других СП осуществление поиска, выделения и изучения подобных ферментов предполагается только в будущем. При этом для многих клеток микроорганизмов (бактерий, грибов, микроводорослей) и их консорциумов выявлена высокая эффективность деградации различных СП (таблица). В консорциумах микроорганизмов значительно увеличивается число ферментов, которые участвуют в биокатализе [56]. Среди них есть те, что воздействуют не только на СП, но и на продукты их деградации [57]. В результате наблюдается смещение химического равновесия в биокаталитической системе в сторону образования продуктов глубокой деградации и, как следствие, ускорение процессов разложения в сравнении с единичными ферментами или клетками, поскольку снижение концентрации промежуточных продуктов приводит к элиминированию ингибирования ими биокаталитических реакций.

При разработке биокаталитических процессов на основе использования консорциумов для деструкции СП исследователи отдают предпочтение искусственным вариантам [22, 27, 40, 52], которые легко воспроизводимы и состоят из хорошо изученных микроорганизмов, метаболизмом которых можно управлять. При этом расширяется разнообразие возможных вариантов сочетания клеток.

Клетки, как БК, в сравнении с отдельными ферментами характеризуются более длительным периодом стабильного участия в процессах деградации СП, который может продолжаться несколько месяцев [17, 28, 35, 49, 50]. Для улучшения показателей стабильности ферментов используются различные способы их иммобилизации [13–15, 18]. При этом крайне интересным представляется использование в качестве носителей для иммобилизации ферментов таких MeK, которые способны участвовать в деградации СП [13, 15, 18]. Наиболее привлекательно выглядят MeK, способствующие образованию активных форм кислорода [3]. Комбинации MeK с ферментами или клетками (единичными или в составе консорциумов), которые способны функционировать в таком сочетании, сегодня изучаются в качестве основы для разработки и исследования новых биокаталитических процессов деградации СП [13, 15, 17, 18].

MeK после их использования в процессах деградации СП остаются в составе получаемых сред

БК для деградации различных СП

БК для деградации СП	Условия биокатализа	Показатели процесса [источник]
Полиэтилентерефталат		
Рекомбинантная кутиназа	2 мкМ фермента, кристалличность пластика – 8,4%, pH 8,2–8,5, 60 °С, 72 ч	СД 59,2% [20]
Рекомбинантная полиэстергидролаза	0,5 мкМ фермента, pH 7,4, 30 °С, 48 ч	Скорость накопления продукта деградации 112,5 мкг/л/ч [21]
Искусственный консорциум: <i>Rhodococcus jostii</i> , два мутантных штамма <i>Bacillus subtilis</i>	30 °С, 7 сут.	СВП 31,2% [22]
Микроводоросль <i>Chlorella vulgaris</i>	pH 7, 30 сут.	СВП 5,5% [23]
ПЭТаза, иммобилизованная на наночастицах F_3O_4	0,5 г/ биокатализатора/л, 20 г полимера/л, pH 7,5, 42 ч, 700 об/мин	Скорость накопления продукта деградации 0,7 мкмоль/г полимера/ч [13]
DuP-M@CaP композит: иммобилизация ПЭТазы (DuP) и моногидроксиэтилтерефлат гидролазы (M) на нанокристаллах $Ca_3(PO_4)_2$	pH 8, 50 °С, 180 об/мин, 10 сут.	СВП 50,3% [14]
ПЭТаза @ $Co_3(PO_4)_2$: иммобилизация ПЭТазы на наноструктурированном $Co_3(PO_4)_2$	pH 4–10, 35 °С, 7 сут.	СВП 25,8% [15]
Полиэтилен		
Бактерии <i>B. subtilis</i>	14 сут., 25 °С	СВП 1,8% [24]
Грибы <i>Zalerion maritimum</i>	2,6 г полимера/л, 25 °С, 120 об/мин, 14 сут.	СВП 43% [25]
Микроводоросль <i>Anabaena spiroides</i>	Режим освещение – 12:12 ч (день/ночь), 27 °С, 30 сут.	СД 8,2% [26]
Консорциум: <i>Acinetobacter</i> sp., <i>Bacillus</i> sp.	4 г полимера/л, 23 °С, 180 об/мин, 30 сут.	СВП 18% [27]
Консорциум морских бактерий родов <i>Oceanimonas</i> , <i>Vibrio</i> , <i>Paenibacillus</i> , <i>Shewanella</i> , <i>Rheinheimera</i> , <i>Bacillus</i>	2 г полимера/л, pH 7,0, 30 °С, 150 об/мин, 120 сут.	СВП 47,1% [28]
Наночастицы серебра и <i>A. oryzae</i>	Концентрация наночастиц 1%, 24 °С, 35 сут.	СД 64,5 % [16]
Суперпарамагнитные наночастицы Fe_3O_4 и смешанный консорциум бактерий и грибов	40 мг полимера/л, 3 мл/л консорциума с наночастицами (0,25–0,75%), 25–37 °С, 120 об/мин, 50 сут.	СВП 55% [17]
Полиакриламид		
<i>Pseudomonas putida</i> , секретирующие амидазы	pH 7,2, 39 °С, 100 об/мин, 7 сут.	СД 45% [29]
Анаэробный ил	10–50 г полимера/кг сух. веществ ила, 55 °С, 15 сут.	СД 76–78% [30]
Поливинилхлорид		
<i>Pseudomonas citronellolis</i>	30 иС, 150 об/мин, 30 сут.	СВП 19% [31]

Продолжение табл.

БК для деградации СП	Условия биокатализа	Показатели процесса [источник]
Консорциум бактерий родов <i>Stenotrophomonas</i> , <i>Enterococcus</i> , <i>Acinetobacter</i>	30 °С, 180 об/мин, 30 сут.	СВП 6,1% [32]
Полипропилен		
<i>Lasiodiplodia theobromae</i> с лакказной активностью	Облучение пластика – 100 кГр, 90 сут.	СВП 1,5% [33]
<i>Rhodococcus</i> sp.	1,9 г полимера/л, 29 °С, 40 сут.	СВП 6,4% [34]
Консорциум <i>Brevibacillus</i> sp. и <i>Aneurinibacillus</i> sp.	pH 7,2, 50 °С, 140 сут.	СВП 56,3% [35]
Поликарбонат		
<i>Pseudoxanthomonas</i> sp.	10 г полимера/л, 180 об/мин, 30 °С, 30 сут.	СВП 30% [36]
Консорциум: <i>Bacillus cereus</i> , <i>Bacillus megaterium</i>	Деградация в почве, 9 месяцев	СВП 0,2% [37]
Полиуретан		
Эстераза E3576	pH 7, 37 °С, 51 сут.	СВП 33% [38]
<i>Penicillium</i> sp.	37 °С, 50 сут.	СВП 8,9% [39]
Консорциум: <i>A. niger</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	37 °С, 30 сут.	СВП 20% [40]
Полистирол		
Ферментный комплекс из P450, диоксигеназ, щелочных гидроксилаз и монооксигеназ	20 мкМ Fe, 0,5% H ₂ O ₂ , 2–3 месяца	СВП 1% [42,44]
<i>Bacillus paralicheniformis</i>	28 °С, 120 об/мин, pH 7,5, 60 сут.	СВП 34% [43]
<i>Bacillus cereus</i>	17 г полимера /л, 25 °С, 50 сут., 120 об/мин	СВП 10,7% [44]
Поливиниловый спирт		
Бактерии <i>Stenotrophomonas</i> sp. SA21	100 мг полимера/л, 30 °С, 4 сут., 4% инокулят, pH 8	СД 90% [45]
Грибы <i>Eutypella</i> sp. VJ	30 °С, 160 об/мин, 8 сут.	СД 87,4% [46]
Поликапролактон		
Липаза и кутиназа, иммобилизованные на наночастицах Fe ₃ O ₄ @SiO ₂	Концентрация наночастиц с ферментами – 0,125–2,0 мг/мл, pH 7,4; 25 °С; 96 ч	СВП 76,6% [18]
<i>Aspergillus</i> sp.	50 °С, pH 7, 180 об/мин, 6 сут.	СВП 100% [47]
<i>A. niger</i>	5×10 ⁵ спор/мл, 30 °С, 21 сут., pH 6,5	СВП 13,9% [48]
<i>Fusarium solani</i>	(1–2)×10 ⁵ спор/мл, pH 6, 25 °С, 6 месяцев	СВП 90% [49]
<i>Thermomyces lanuginosus</i>	50 °С, 91 сут., компост	СВП 100% [50]

Окончание табл.

БК для деградации СП	Условия биокатализа	Показатели процесса [источник]
Природный консорциум: <i>Apiotrichum porosum</i> , <i>Penicillium samsonianum</i> , <i>Talaromyces pinophilus</i> , <i>Purpureocillium lilacinum</i> , <i>Fusicolla acetilerea</i>	Твердофазное культивирование на полимере, 28 сут.	Формирование зон разрушения полимерной матрицы [51]
Искусственный консорциум: <i>A. niger</i> , <i>Penicillium funiculosum</i> , <i>Chaetomium globosum</i> , <i>Gliocladium virens</i> , <i>Aureobasidium pullulans</i>	2×10^4 спор/мл каждого гриба; pH 4,7, 140 об./мин, 28 сут., 27 °C	Снижение предела прочности полимерной матрицы на 14% [52]

Обозначения: СД – степень деградации, СВП – снижение веса полимера, ПЭТаза – полиэтилентерефталат-гидролаза.

с образующимися продуктами, что нежелательно, поэтому наиболее интересными среди них являются те варианты, которые относятся к числу «извлекаемых» катализаторов, в частности, являются супермагнитными наночастицами [13, 17]. В отличие от ферментов, в функционировании MeK сложно добиться высокой стабильности из-за их инактивации в водных средах. Это необходимо учитывать при их выборе [9, 58]. При этом для клеток, комбинируемых в процессах с MeK,

возможна стабилизация за счет их иммобилизации [56, 59].

Биокатализ сегодня на практике не применяется для деградации СП, но активно исследуется, поскольку обладает высоким прикладным потенциалом [60], представляется экологичным и эффективным решением проблемы, поэтому будет стимулировать поиск и дизайн новых ферментов и их продуцентов, MeK и их лучших комбинаций для разложения СП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Skoczinski P., Carus M., Tweddle G., Ruiz P., de Guzman D., Ravenstijn J., Káb H., Hark N., Dammer L., Raschka A. // *Ind. Biotechnol.* 2023. Vol. 19. P. 185 (DOI: 10.1089/ind.2023.29322.psk).
- Kalali E.N., Lotfian S., Shabestari M.E., Khayatzaeh S., Zhao C., Nezhad H.Y. // *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.* 2023. Vol. 40. Paper. 100763 (DOI: 10.1016/j.cogsc.2023.100763).
- Efremenko E.N., Lyagin I.V., Maslova O.V., Senko O.V., Stepanov N.A., Aslanli A.G. // *Russ. Chem. Rev.* 2023. Vol. 92. P. 1 (DOI: 10.57634/RCR5069).
- Gluth V., Duquesne S., Guillamot F., Cramail H., Taton D., Marty A., Andre I. // *Chem. Rev.* 2023. Vol. 123. P. 5612 (DOI: 10.1021/acs.chemrev.2c00644).
- Gluth A., Xu Z., Fifield L.S., Yang B. // *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2022. Vol. 170. Paper 112966 (DOI: 10.1016/j.rser.2022.112966).
- Bher A., Mayekar P.C., Auras R.A., Schvezov C.E. // *Int. J. Mol. Sci.* 2022. Vol. 23. N 20. Paper. 12165 (DOI: 10.3390/ijms232012165).
- Afianti N.F., Rachman A., Hatmanti A., Yogaswara D., Anggiani M., Fitriya N., Darmayati Y. // *J. Ecol. Eng.* 2022. Vol. 23. P. 261 (DOI: 10.12911/22998993/145463).
- Borthakur D., Rani M., Das K., Shah M.P., Sharma B.K., Kumar A. // *Lett. Appl. Microbiol.* 2022. Vol. 75. P. 744 (DOI: 10.1111/lam.13616).
- Maslova O., Senko O., Akopyan A., Lysenko S., Anisimov A., Efremenko E. // *Catalysts.* 2021. Vol. 11. Paper 1131 (DOI: 10.3390/catal11091131).
- Maslova O., Senko O., Gladchenko M.A., Gaydamaka S.N., Efremenko E. // *Appl. Sci.* 2023. Vol. 13. Paper 5815 (DOI: 10.3390/app13095815).
- Maslova O., Senko O., Stepanov N., Gladchenko M., Gaydamaka S., Akopyan A., Eseva E., Anisimov A., Efremenko E. // *Bioresour. Technol.* 2022. Vol. 362. Paper 127794 (DOI: 10.1016/j.biortech.2022.127794).
- Efremenko E., Stepanov N., Aslanli A., Lyagin I., Senko O., Maslova O. // *J. Funct. Biomater.* 2023. Vol. 14. P. 64 (DOI: 10.3390/jfb14020064).
- Schwaminger S.P., Fehn S., Steegmüller T., Raufwolf S., Löwe H., Pflüger-Grau K., Berensmeier S. // *Nanoscale Adv.* 2021. Vol. 3. P. 4395 (DOI: 10.1039/D1NA00243K).
- Chen K., Dong X., Sun Y. // *J. Hazard. Mater.* 2022. Vol. 438. P. 129517 (DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.129517).
- Jia Y., Samak N.A., Hao X., Chen Z., Yang G., Zhao X., Mu T., Yang M., Xing J. // *Biochem. Eng. J.* 2021. Vol. 176. P. 108205 (DOI: 10.1016/j.bej.2021.108205).
- Jayaprakash V., Palempalli U.M.D. // *Appl. Nanosci.* 2019. Vol. 9. P. 491 (DOI: 10.1007/s13204-018-0922-6).
- Patel K.M., Tiwari A., Yadav M. // *Int. J. Adv. Res. Biol. Sci.* 2017. Vol. 4. P. 8 (DOI: 10.22192/ijarbs.2017.04.07.002).

18. Krakor E., Gessner I., Wilhelm M., Brune V., Hohnsen J., Frenzen L., Mathur S. // *MRS Commun.* 2021. Vol. 11. P. 363 (DOI: 10.1557/s43579-021-00039).
19. Edeleva M., De Smit K., Debrie S., Verberckmoes A., Marien Y.W., D'hooge D.R. // *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.* 2023. Vol. 43. P. 100848 (DOI: 10.1016/j.cogsc.2023.100848).
20. Oda M., Yamagami Y., Inaba S., Oida T., Yamamoto M., Kitajima S., Kawai F. // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2018. Vol. 102. P. 10067 (DOI: 10.1007/s00253-018-9374-x).
21. Bollinger A., Thies S., Knieps-Grünhagen E., Gertzen C., Kobus S., Höppner A., Ferrer M., Gohlke H., Smits S.H.J., Jaeger K.E. // *Front. Microbiol.* 2020. Vol. 11. P. 114 (DOI: 10.3389/fmicb.2020.00114).
22. Qi X., Ma Y., Chang H., Li B., Ding M., Yuan Y. // *Front. Microbiol.* 2021. Vol. 12. P. 778828 (DOI: 10.3389/fmicb.2021.778828).
23. Falah W., Chen F.J., Zeb B.S., Hayat M.T., Mahmood Q., Ebadi A., Toughani M., Li E.Z. // *Mater. Plast.* 2020. Vol. 57. P. 260 (DOI: 10.37358/Mat.Plast.1964).
24. Harshvardhan K., Jha B. // *Mar. Pollut. Bull.* 2013. Vol. 77. P. 100 (DOI: 10.1016/j.marpolbul.2013.10.025).
25. Paço A., Duarte K., da Costa J.P., Santos P.S., Pereira R., Pereira M.E., Freitas A.C., Duarte A.C., Rocha-Santos T.A. // *Sci. Total Environ.* 2017. Vol. 586. P. 10 (DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.017).
26. Kumar R.V., Kanna G.R., Elumalai S. // *J. Bioremediat. Biodegrad.* 2017. Vol. 8. P. 1000381 (DOI: 10.4172/2155-6199.1000381).
27. Yin C.F., Xu Y., Zhou N.Y. // *Int. Biodeter. Biodegr.* 2020. Vol. 155. P. 105089 (DOI: 10.1016/j.ibiod.2020.105089).
28. Joshi G., Goswami P., Verma P., Prakash G., Simon P., Vinithkumar N.V., Dharani G. // *J. Hazard. Mater.* 2022. Vol. 425. P. 128005 (DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.128005).
29. Yu F., Fu R., Xie Y., Chen W. // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2015. Vol. 12. P. 4214 (DOI: 10.3390/ijerph120404214DOI).
30. Akbar M., Khan M.F.S., Qian L., Wang H. // *Front. Environ. Sci. Eng.* 2020. Vol. 14. P. 98 (DOI: 10.1007/s11783-020-1277-2).
31. Giacomucci L., Raddadi N., Soccio M., Lotti N., Fava F. // *New Biotechnol.* 2019. Vol. 52. P. 35 (DOI: 10.1016/j.nbt.2019.04.005).
32. Xu Y., Xian Z.N., Yue W., Yin C.F., Zhou N.Y. // *Chemosphere.* 2013. Vol. 318. P. 137944 (DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.164721).
33. Sheik S., Chandrashekar K.R., Swaroop K., Somashekarappa H.M. // *Int. Biodeter. Biodegr.* 2015. Vol. 105. P. 21 (DOI: 10.1016/j.ibiod.2015.08.006).
34. Auta H.S., Emenike C.U., Jayanthi B., Fauziah S.H. // *Mar. Pollut. Bull.* 2018. Vol. 127. P. 15 (DOI: 10.1016/j.marpolbul.2017.11.036).
35. Skariyachan S., Patil A.A., Shankar A., Manjunath M., Bachappanavar N., Kiran S. // *Polym. Degrad. Stab.* 2018. Vol. 149. P. 52 (DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2018.01.018).
36. Yue W., Yin C.F., Sun L., Zhang J., Xu Y., Zhou N.Y. // *J. Hazard. Mater.* 2021. Vol. 416. P. 125775 (DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125775).
37. Arefian M., Tahmourespour A., Zia M. // *Arch. Environ. Prot.* 2020. Vol. 46. P. 14 (DOI: 10.24425/aep.2020.132521).
38. Magnin A., Pollet E., Perrin R., Ullmann C., Persillon C., Phalip V., Averous L. // *Waste Manag.* 2019. Vol. 85. P. 141 (DOI: 10.1016/j.wasman.2018.12.024).
39. Magnin A., Hoornaert L., Pollet E., Laurichesse S., Phalip V., Avérous L. // *Microb. Biotechnol.* 2019. Vol. 12. P. 544 (DOI: 10.1111/1751-7915.13346).
40. Fernandes I.P., Barbosa M., Amaral J.S., Pinto V., Rodrigues J.L., Ferreira M.J., Barreiro M.F. // *J. Renew. Mater.* 2016. Vol. 4. P. 47 (DOI: 10.7569/JRM.2015.634126).
41. Zhang Y., Pedersen J., Eser B., Guo Z. // *Biotechnol. Adv.* 2022. Vol. 60. P. 107991 (DOI: 10.1016/j.biotechadv.2022.107991).
42. Hou L., Majumder E.L. // *Materials (Basel)* 2021. Vol. 14. P. 503 (DOI: 10.3390/ma14030503).
43. Kumar A.G., Hinduja M., Sujitha K., Rajan N.N., Dharani G. // *Sci. Total Environ.* 2021. Vol. 774. P. 145002 (DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145002).
44. Yuan J., Cao J., Yu F., Ma J. // *Sustainable Chem. Pharm.* 2022. Vol. 30. P. 100873 (DOI: 10.1016/j.scp.2022.100873).
45. Ullah M., Weng C.H., Li H., Sun S.W., Zhang H., Song A.H., Zhu, H. // *Environ. Technol.* 2018. Vol. 39. P. 2056 (DOI: 10.1080/09593330.2017.1349189).
46. Deng Y., Wang C., Liu Y., Chen P., Lin X., Zhang Y. // *RSC Adv.* 2019. Vol. 9. P. 27398 (DOI: 10.1039/C9RA04410H).
47. Sanchez J.G., Tsuchii A., Tokiwa Y. // *Biotechnol. Lett.* 2000. Vol. 22. P. 849 (DOI: 10.1023/A:1005603112688).
48. Kim Y.C., Jun H.S., Chang H.N., Woo S.I. // *Korean J. Chem. Eng.* 1995. Vol. 12. P. 320 (DOI: 10.1007/BF02705763).
49. Antipova T.V., Zhelifonova V.P., Zaitsev K.V., Nedorezova P. M., Aladyshev A.M., Klyamkina A.N., Kostyuk S.V., Danilogorskaya A.A., Kozlovsky A.G. // *J. Polym. Environ.* 2018. Vol. 26. P. 4350 (DOI: 10.1007/s10924-018-1307-3).
50. Al Hosni A.S., Pittman J.K., Robson G.D. // *Waste Manage.* 2019. Vol. 97. P. 105 (DOI: 10.1016/j.wasman.2019.07.042).
51. Lee S.-Y., Ten L.N., Das K., You Y.-H., Jung H.-Y. // *Mycobiology.* 2021. Vol. 49. P. 285 (DOI: 10.1080/12298093.2021.1903131).
52. Tilstra L., Johnsonbaugh D. // *J. Environ. Polym. Degrad.* 1993. Vol. 1. P. 257 (DOI: 10.1007/BF01458292).
53. Mohanan N., Montazer Z., Sharma P.K., Levin D.B. // *Front. Microbiol.* 2020. Vol. 11. P. 580709 (DOI: 10.3389/fmicb.2020.580709).
54. Fortuna S., Cespugli M., Todea A., Pellis A., Gardossi L. // *Catalysts.* 2021. Vol. 11. P. 784 (DOI: 10.3390/catal11070784).
55. Rosato A., Romano A., Totaro G., Celli A., Fava F., Zanaroli G., Sisti L. // *Polymers.* 2022. Vol. 14. P. 1850 (DOI: 10.3390/polym14091850).
56. Efremenko E., Senko O., Stepanov N., Aslanli A.,

- Maslova O., Lyagin I. // *Microorganisms*. 2023. Vol. 11. P. 1395 (DOI: 10.3390/microorganisms11061395).
57. Zhu B., Ye Q., Seo Y., Wei N. // *Environ. Sci. Technol. Lett.* 2022. Vol. 9. P. 650 (DOI: 10.1021/acs.estlett.2c00332).
58. Lyagin I., Stepanov N., Frolov G., Efremenko E. // *Int. J. Mol. Sci.* 2022. Vol. 23. P. 1359 (DOI: 10.3390/ijms23031359).
59. Maslova O., Senko O., Stepanov N., Gladchenko M., Gaydamaka S., Akopyan A., Polina Polikarpova P., Lysenko S., Anisimov A., Efremenko E. // *Bioresour. Technol.* 2021. Vol. 319. P. 124248 (DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124248).
60. Zheng K., Hu K., Wang S., Jiao X., Zhu J., Sun Y., Xie Y. // *Chem. Soc. Rev.* 2023. Vol. 52. P. 8 (DOI: 10.1039/D2CS00688J).

Информация об авторах

Ольга Васильевна Маслова – науч. сотр. кафедры химической энзимологии химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова, канд. хим. наук (olga.maslova.rabota@gmail.com);

Ольга Витальевна Сенько – науч. сотр. кафедры химической энзимологии химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова, мл. науч. сотр. ИБХФ РАН, канд. хим. наук (senkoov@gmail.com);

Николай Алексеевич Степанов – науч. сотр. кафедры химической энзимологии химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова, мл. науч. сотр. ИБХФ РАН, канд. техн. наук (na.stepanov@gmail.com);

Илья Владимирович Лягин – ст. науч. сотр. кафедры химической энзимологии химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова, науч. сотр. ИБХФ РАН, канд. хим. наук (lyagin@mail.ru);

Елена Николаевна Ефременко – зав. лабораторией эковиокатализа кафедры химической энзимологии химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова, ст. науч. сотр. ИБХФ РАН, докт. биол. наук, профессор (elena_efremenko@list.ru).

Соблюдение этических стандартов

В данной работе отсутствуют исследования человека и животных.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 30.10.2023;
одобрена после рецензирования 12.11.2023;
принята к публикации 14.11.2023.