DOI: https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2026.4.7

UDC 579.66
LBC 28.472.32

THE EFFECT OF CULTIVATION CONDITIONS ON THE ABILITY OF BACTERIA TO CARRY OUT BIODEGRADATION OF POLYETHYLENE TEREPHTHALATE

Timofey O. Dyachenko
Volgograd State University, Volgograd, Russian Federation

Andrey Yu. Getmanenko
Volgograd State University, Volgograd, Russian Federation

Abstract. The relevance of the study is driven by the global accumulation of polyethylene terephthalate (PET) waste and the low efficiency of conventional recycling methods. Microbial biodegradation is a promising alternative, yet its natural rate remains insufficient. This work aims to investigate the effect of different concentrations of nicotinic acid (vitamin B) on the bacterial ability to degrade PET under controlled cultivation conditions. The experiment was performed on 8 PET samples (2×2 cm) in a modified R2A agar medium. Samples were incubated for 30 days at 25 °C with nicotinic acid added at 0,5 and 10 mg/mL. Biodegradation was assessed gravimetrically using analytical balances with a precision of ± 0.0002 g. The results revealed the maximum mass loss (0.0005 g) at 5 mg/mL, while the 10 mg/mL concentration reduced the degradative effect to the control level. However, most mass changes fell within the instrument's error margin, preventing a definitive confirmation of statistically significant biodegradation enhancement. These findings highlight the need for more sensitive analytical techniques (chromatography, electron microscopy) and longer cultivation periods for an accurate quantitative assessment of the stimulating effect of nicotinic acid.

Key words: biodegradation, polyethylene terephthalate, nicotinic acid, destructive bacteria, enzymatic hydrolysis, PET hydrolase, cultivation.

Citation. Dyachenko T.O., Getmanenko A.Yu. The Effect of Cultivation Conditions on the Ability of Bacteria to Carry Out Biodegradation of Polyethylene Terephthalate. *Prirodnye sistemy i resursy* [Natural Systems and Resources], 2026, vol. 16, no. 4, pp.70-77. DOI: https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2026.4.7

УДК 579.66
ББК 28.472.32

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ НА СПОСОБНОСТЬ БАКТЕРИЙ К БИОДЕГРАДАЦИИ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА

Тимофей Олегович Дьяченко
Волгоградский государственный университет, г. Волгоград, Российская Федерация

© Дьяченко Т.О., Гетманенко А.Ю., 2026

Андрей Юрьевич Гетманенко

Волгоградский государственный университет, г. Волгоград, Российская Федерация

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена глобальным накоплением отходов полиэтилентерефталата (ПЭТ) и низкой эффективностью существующих методов его утилизации. Перспективным направлением является микробная биодеградация, однако ее естественная скорость остается недостаточной. Цель работы – изучение влияния различных концентраций никотиновой кислоты на способность бактерий к деструкции ПЭТ в контролируемых условиях культивирования. Эксперимент проводили на 8 образцах ПЭТ размером 2×2 см в модифицированной среде Агар R2A. Образцы инкубировали 30 суток при 25 °С с добавлением никотиновой кислоты в концентрациях 0,5 и 10 мг/мл. Оценку биодеградации выполняли гравиметрическим методом на аналитических весах с точностью ± 0,0002 г. Результаты показали, что максимальное изменение массы (0,0005 г) зафиксировано при концентрации 5 мг/мл, тогда как при 10 мг/мл деструктивный эффект снижался до уровня контроля. Однако большинство значений изменения массы находились в пределах погрешности прибора, что не позволяет однозначно подтвердить статистически значимое ускорение биодеградации. Полученные данные свидетельствуют о необходимости применения более чувствительных аналитических методов и увеличения сроков культивирования для корректной количественной оценки стимулирующего эффекта никотиновой кислоты.

Ключевые слова: биодеградация, полиэтилентерефталат, никотиновая кислота, бактерии-деструкторы, ферментативный гидролиз, ПЭТ-гидролаза, культивирование.

Цитирование. Дьяченко Т. О., Гетманенко А. Ю. Влияние условий культивирования на способность бактерий к биодеградации полиэтилентерефталата // Природные системы и ресурсы. – 2026. – Т. 16, № 4. – С. 70–77. – DOI: https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2026.4.7

Введение

Синтетические пластмассы вошли во все сферы человеческой деятельности, однако их высокая устойчивость к биодеградации породила глобальную экологическую проблему. К настоящему времени на планете накопилось около 6,5 млрд тонн пластиковых отходов, и при сохранении текущих тенденций к 2050 г. этот показатель может возрасти до 12 млрд тонн [1]. Среди наиболее распространенных полимеров особое место занимает полиэтилентерефталат (ПЭТ), используемый преимущественно для производства одноразовой упаковки и тары. Традиционные методы утилизации – захоронение, сжигание и механическая переработка – обладают существенными недостатками, включая образование микропластика и ухудшение качества материала при каждом цикле переработки [7; 8].

В связи с этим все большее внимание исследователей привлекает микробная биодеградация – способность микроорганизмов использовать синтетические полимеры в качестве источника углерода и энергии [2–6; 9–12; 16; 17].

Ключевым открытием последних лет стала бактерия *Ideonella sakaiensis*, разлагающая ПЭТ с помощью двух ферментов – ПЭТазы и МГЭТазы [13]. Однако естественная скорость микробного разложения пластиков остается крайне низкой, что требует разработки методов ее интенсификации [19].

Перспективным подходом является использование физико-химических факторов, стимулирующих катаболическую активность микроорганизмов-деструкторов. Никотиновая кислота – предшественник коферментов НАД и НАДФ, играющих ключевую роль в окислительно-восстановительных реакциях, способна интенсифицировать энергетический обмен клетки. Добавление никотиновой кислоты в концентрации 0,005–0,01 % увеличивает скорость выделения ПЭТазы у *I. sakaiensis* на 38 % [15], а для штаммов *Bacillus spp.* стимулирует экспрессию гидролаз и увеличивает потерю массы ПЭТ на 12–17 % [14]. Важно отметить, что положительный эффект реализуется только в условиях, когда ПЭТ служит единственным источником углерода. Исследования мест накопления пластика показывают, что природные консорциумы микроорганизмов обладают значительным потенциалом биодеградации, который может быть усилен за счет добавления кофакторных соединений [2; 3; 5; 18].

Целью данной работы является изучение влияния никотиновой кислоты на способ-

ность бактерий к биодеградации полиэтилентерефталата в контролируемых условиях культивирования.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Произвести посев культуры микроорганизмов в среды с известными концентрациями никотиновой кислоты, где основным источником углерода является ПЭТ.

2. Оценить деструктивную активность штамма в отношении ПЭТ в лабораторных условиях.

3. Проанализировать корреляцию между концентрацией никотиновой кислоты в среде и изменением массы образца ПЭТ.

Материалы и методы исследования

Для проведения опытов использовались следующие реактивы: вода дистиллированная (Получена в лаборатории с использованием дистиллятора, Россия), Агар-Агар (Е406, микробиологическая чистота, ООО «БиоХим», кат. № БХ-208, Россия), ГРМ Агар (пептон, гидролизат казеина, агар-агар, микробиологическая чистота, ООО «Оболенск», кат. № ОБ-329, Россия), Дикалий фосфат (K_2HPO_4, ≥ 98 %, ООО «Химмед», кат. № ХМ-247, Россия), магния сульфат ($MgSO_4$, ≥ 99,5 %, ООО «Химмед», кат. № ХМ-189, Россия), натрия хлорид (NaCl, ≥ 99,5 %, ООО «БиоХим», кат. № БХ-015, Россия), никотиновая кислота (Pyridine-3-carboxylic acid ≥ 99,5 % HPLC, ООО «Биохиммаш», кат. № БХМ-442, Россия), пивные дрожжи (инактивированные, пищевой сорт, ООО «Биокомпозит», кат. № БК-045, Россия), полиэтилентерефталат (ПЭТ, фрагменты пластиковой бутылки, ООО «Завод Святой Источник», Россия).

Так же было использовано оборудование: автоклав (Tuttnauer Autoclave, model 2540EKA, max pr 2.8, Израиль), весы аналитические (Ohaus DV-214C, НПВ 210 г., погрешность 0,0002 г, Швейцария), сухожаровой шкаф (ШС-80-01 СПУ, Задаваемые температуры: + 50... + 200 °С, Смоленское СКТБ СПУ, Смоленск), термостат (Orbital Shaker – Incubator ES-20, диапазон регулирования температуры + 25... + 42 С°, Biosan, Латвия), УФ-бокс (БМБ-II-"Ламинар-С"–1,2 (221.120) Класс II (Тип А2), размер рабочей зоны 1 105 × 450 мм, г. Миасс, Россия).

Объект исследования в данной работе - образцы полиэтилентерефталата ($n = 8$) в виде пластин размером 2 × 2 см, полученные из одноразовой пластиковой бутылки.

Этапы исследования влияния условий культивирования

В качестве базовой питательной среды для проведения данного исследования была выбрана среда Агар R2A, однако ее классический состав был подвергнут переработке (табл. 1).

Для стерилизации в автоклав были загружены питательная среда и необходимая посуда, стерилизация проводилась при +120 °С, 1,2 атм. в течение 30 мин. Были получены первичные массы образцов ПЭТ, взвешенных на весах (см. табл. 2). После первичного взвешивания образцы были доведены до постоянной массы в сухожаровом шкафу при +80 °С в течение 30 мин (см. табл. 2). Исследуемые образцы помещались в УФ-бокс для стерилизации на 30 мин.

В суспензию из микроорганизмов и физиологического раствора были внесены образцы № 3–8. В чашки Петри было залито по 50 мл среды и внесено по два образца в следующей последовательности:

Контрольный образец – 1 и 2
Опыт 1 – 3 и 4
Опыт 2 – 5 и 6
Опыт 3 – 7 и 8

Таблица 1

Состав питательной среды для посева (г/400 мл)

Название реактивов	Масса (г)
Дикалий фосфат	0,12
Пивные дрожжи	0,2
Сульфат магния	0,0096
ГРМ Агар (пептон, гидролизат казеина, агар-агар)	0,65
Агар-агар	5,8

Никотиновая кислота разводилась в пробирках типа эппендорф и вносилась в опытные среды в объеме 1 мл:

Опыт 1 – 0 мг/мл

Опыт 2 – 5 мг/мл

Опыт 3 – 10 мг/мл

Микроорганизмы культивировались 30 дней в термостате при +25 °С. По истечении 30 дней образцы ПЭТ были очищены от остатков питательной среды. Образцы доводились до постоянной массы в сушильном шкафу при +80 °С на 30 мин и взвешивались. Были получены контрольные массы образцов ПЭТ после культивирования (табл. 2).

Ниже приведены отдельные уточнения, относящиеся к методам, примененным в настоящем исследовании.

Метод высушивания в сухожаровом шкафу. Выбор температуры обусловлен необходимостью полного удаления влаги без разрушения полимерной матрицы ПЭТ (температура стеклования ПЭТ составляет около +70…+75 °С, температура плавления – выше +230 °С), что позволяло избежать деформации и термической деградации образцов.

Метод стерилизации ультрафиолетовым излучением. Образцы помещали в УФ-бокс и подвергали воздействию ультрафиолетового излучения с длиной волны 254 нм в течение 30 минут. Выбор данного метода обусловлен его эффективностью для инактивации микроорганизмов на поверхности твердых материалов без нарушения структуры и свойств полимера

Статистическая обработка. Обработку экспериментальных данных проводили методом сравнения начальной и конечной массы образцов ПЭТ. Для каждого варианта концентрации никотиновой кислоты (0,5 и 10 мг/мл) изменение массы рассчитывали, как разность между средними значениями начальной и конечной массы образцов. Значения изменения массы, находившиеся в пределах погрешности прибора (± 0,0002 г), интерпретировали как недостоверные и не подлежащие однозначной трактовке в качестве биодеградации. Для наглядного представления полученных данных строили график зависимости изменения массы образцов ПЭТ от концентрации никотиновой кислоты в среде культивирования.

Результаты и обсуждение

Разница масс была рассчитана путем вычитания массы образцов ПЭТ после культивирования из контрольной массы до культивирования (табл. 2).

Была построена столбчатая диаграмма показывающая отношение изменения масс образцов друг к другу при различных концентрациях никотиновой кислоты (см. рис. 1).

Поскольку все изменения масс незначительны, нельзя с уверенностью утверждать, что масса была изменена под действием биодеградации. Предел погрешности используемых весов, равный 0,0002 г, указывает на непригодность результатов опытов 4, 6 и 8.

Однако, никотиновая кислота способна не только повышать степень биодеградации, но и понижать через сильное окисление (см. рис. 2).

На основании полученных результатов можно предположить, что концентрация никотиновой кислоты 5 мг/мл близка к оптимальной, тогда как концентрация 10 мг/мл снижает биодеградацию ПЭТ до уровня естественного биоразложения микроорганизмами.

Таблица 2

Разница масс образцов ПЭТ

№ образца	Первичная масса образцов ПЭТ (г)	Контрольная масса образцов ПЭТ до культивирования (г)	Контрольная масса образцов ПЭТ после культивирования (г)	Изменение массы (г)
1	0,1366	0,1358	0,1358	0
2	0,1466	0,1450	0,1450	0
3	0,1337	0,1325	0,1322	0,0003
4	0,1416	0,1403	0,1401	0,0002
5	0,1373	0,1363	0,1358	0,0005
6	0,1382	0,1370	0,1368	0,0002
7	0,1375	0,1366	0,1363	0,0003
8	0,1387	0,1376	0,1375	0,0001

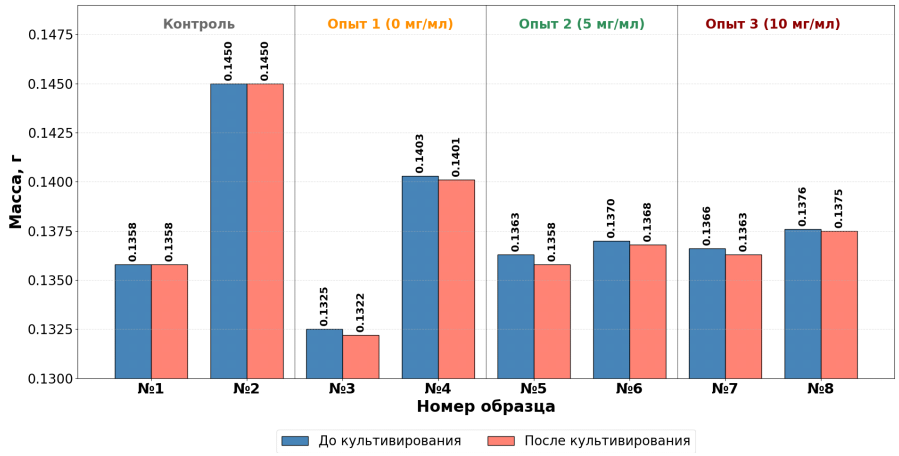

Рис. 1. Изменение масс образцов ПЭТ

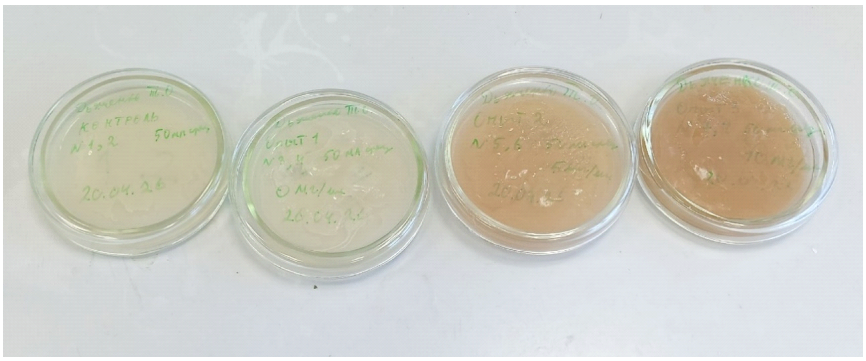

Рис. 2. Питательные среды после культивации

Заключение

В ходе исследования было установлено, что добавление никотиновой кислоты в питательную среду оказывает разнонаправленное влияние на способность бактерий к биодеградации полиэтилентерефталата. Наибольшее изменение массы образцов (0,0005 г) зафиксировано при концентрации 5 мг/мл, что позволяет рассматривать данный уровень как приближенный к оптимальному для стимуляции деструктивной активности микроорганизмов. Однако, учитывая, что большая часть полученных значений изменения массы находится в пределах погрешности аналитических весов (± 0,0002 г), достоверно подтвердить значительное ускорение биодеградации ПЭТ в выбранных условиях не представляется возможным. Повышение концентрации никотиновой кислоты до 10 мг/мл, напротив, сопровождается снижением деструктивного эффекта, вероятно, вследствие окислительного стресса для бактериальной культуры. Полученные результаты указывают на необходимость дальнейших исследований с использованием более чувствительных методов оценки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов, Д. В. Перспективы переработки пластиковых отходов на основе полиэтиленгликольтерефталата с применением живых систем (обзор) / Д. В. Белов, С. Н. Беляев // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2022. – Т. 12, № 2 (41). – С. 238–253. – DOI: 10.21285/2227-2925-2022-12-2-238-253

2. Герман, Н. В. Особенности микробных сообществ в зональных почвах аридной зоны юго-востока Европейской части России / Н. В. Герман, Е. А. Иванцова, А. В. Холоденко // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 11, Естественные науки. – 2017. – Т. 7, № 3. – С. 31–38. – DOI: https://doi.org/10.15688/jvolsu11.2017.3.4

3. Горбунова, К. О. Биохимические исследования микроорганизмов, выделенных на светло-каштановых почвах г. Волгограда / К. О. Горбунова, А. А. Григорян, Е. А. Иванцова // Итоги и перспективы развития

агропромышленного комплекса : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – с. Соленое Займище, 2019. – С. 370–374.

4. Иванцова, Е. А. Аридные экосистемы в условиях техногенного прессинга / Е. А. Иванцова, В. В. Новочадов, Н. В. Онистратенко // Академический вестник ELPIT. – 2018. – Т. 3, № 4 (6). – С. 22–28.

5. Иванцова, Е. А. Культуральные и морфологические исследования симбиотической микробиоты светло-каштановых почв / Е. А. Иванцова, К. О. Горбунова, А. А. Григорян // Итоги и перспективы развития агропромышленного комплекса: материалы международной научно-практической конференции. – с. Соленое Займище, 2019. – С. 258–263.

6. Иванцова, Е. А. Оптимизация фитосанитарного состояния агробиоценозов Нижнего Поволжья : дис. ... д-ра с.-х. наук / Иванцова Елена Анатольевна. – Саратов, 2009. – 453 с.

7. Иванцова, Е. А. Проблемы и перспективы управления твердыми бытовыми отходами / Е. А. Иванцова // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 3, Экономика. Экология. – 2016. – № 2 (35). – С. 148–159.

8. Микробная деградация пластика и пути ее интенсификации / И. Б. Котова [и др.] // Микробиология. – 2021. – Т. 90, № 6. – С. 627–659. – DOI: 10.31857/S0026365621060082

9. Снижение негативного воздействия на агроценозы путем управления примыкающими природно-антропогенными системами / Е. А. Иванцова [и др.] // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 3: Экономика. Экология. – 2017. – Т. 19, № 4 (41). – С. 138–146. – DOI: https://doi.org/10.15688/jvolsu3.2017.4.15

10. Сравнение таксономического состава бактериальных обрастаний, развивающихся на поверхности различных материалов, экспонированных в водных средах / Т. П. Турова [и др.] // Микробиология. – 2021. – Т. 90, № 4. – С. 400–412. – DOI: 10.31857/S0026365621040182

11. Шевцов, Д. А. Оценка фитотоксичности светло-каштановой почвы при ее загрязнении сырой нефтью и использовании биопрепаратов-нефтедеструкторов / Д. А. Шевцов, Е. А. Иванцова, В. В. Новочадов // Вестник Нижневартовского государственного университета. – 2025. – № 1 (69). – С. 100–110.

12. Экобиотехнологии оптимизации аридных фитоценозов юго-востока европейской части России / Е. А. Иванцова [и др.]. – Волгоград, 2019. – 76 с.

13. A Bacterium that Degrades and Assimilates Poly(Ethylene Terephthalate) / S. Yoshida [et al.] // Science. – 2016. – Vol. 351, no. 6278. – P. 1196–1199. – DOI: 10.1126/science.aad6359

14. Biodegradation of Poly(Ethylene Terephthalate) by Bacillus Safensis YX8 / C. Zeng [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. – 2023. – Vol. 24, no. 22. – P. 16434. – DOI: 10.3390/ijms242216434

15. Improving the Activity and Thermostability of PETase from Ideonella Sakaiensis Through Modulating its Post-Translational Glycan Modification / B. Deng [et al.] // Communications Biology. – 2023. – Vol. 6, no. 1. – P. 39. – DOI: 10.1038/s42003-023-04413-0

16. Ecological Aspects Phitosanitary Optimization of Arid Agrobiocenoses of the South of Russia / E. A. Ivantsova [et al.] // Bulgarian Journal of Agricultural Science. – 2017. – T. 23, № 5. – С. 834–842.

17. Heavy Metals in Suburban Ecosystems of Industrial Centres and Ways of Their Reduction / N. B. Onistratenko [et al.] // Ekologia (Bratislava). – 2016. – Vol. 35, no. 3. – P. 205–212.

18. Microplastics Biodegradation by Estuarine and Landfill Microbiomes / C. S. Pires [et al.] // MDPI Proceedings. – 2024. – DOI:10.1007/s00248-024-02399-8

19. Wei, R. Biocatalysis as a Green Route for Recycling the Recalcitrant Plastic Polyethylene Terephthalate / R. Wei, W. Zimmermann // Microbial Biotechnology. – 2017. – Vol. 10, no. 6. – P. 1302–1307. – DOI: 10.1111/1751-7915.12714

REFERENCES

1. Belov D.V., Belyayev S.N. Perspektivy pererabotki plastikovykh otkhodov na osnove polietilenglikoltereftalata s primeneniyem zhivykh sistem (obzor) [Prospects for Processing Pplastic Waste Based on Polyethylene Glycol Terephthalate Using Living Systems (Review)]. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya* [Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology], 2022, vol. 12, no. 2 (41), pp. 238-253. DOI: 10.21285/2227-2925-2022-12-2-238-253

2. German N.V., Ivantsova E.A., Kholodenko A.V. Osobennosti mikrobnykh soobshchestv v zonalnykh pochvakh aridnoy zony yugo-vostoka yevropeyskoy chasti Rossii [Features of Microbial Communities in Zonal Soils of the Arid Zone in the Southeastern Part of the European Russia]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 11, Estestvennye nauki* [Science Journal of Volgograd State University. Natural Sciences], 2017, vol. 7, no. 3, pp. 31-38. DOI: https://doi.org/10.15688/jvolsu11.2017.3.4

3. Gorbunova K.O., Grigoryan A.A., Ivantsova E.A. Biokhimicheskiye issledovaniya mikroorganizmov, vydelennykh na svetlo-kashtanovykh pochvakh g. Volgograda [Biochemical Studies of Microorganisms Isolated from Light Chestnut Soils in the City of Volgograd]. *Itogi i perspektivy razvitiya agropromyshlennogo kompleksa: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Results and Prospects for the Development of the Agroindustrial Complex. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. Solyonoye Zaymishche, 2019, pp. 370-374.

4. Ivantsova E.A., Novochadov V.V., Onistratenko N.V. Aridnyye ekosistemy v usloviyakh tekhnogennogo pressinga [Arid Ecosystems Under Technogenic Pressure]. *Akademicheskiy vestnik ELPIT* [Academic Bulletin of ELPIT], 2018, vol. 3, no. 4 (6), pp. 22-28.

5. Ivantsova E.A., Grigoryan A.A., Gorbunova K.O. Kulturalnyye i morfologicheskiye issledovaniya simbioticheskoy mikrobioty svetlo-kashtanovykh pochv [Cultural and Morphological Studies of the Symbiotic Microbiota of Light Chestnut Soils]. *Itogi i perspektivy razvitiya agropromyshlennogo kompleksa: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Results and Prospects for the Development of the Agroindustrial Complex. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. Solyonoye Zaymishche, 2019, pp. 258-263.

6. Ivantsova E.A. *Optimizatsiya fitosanitarnogo sostoyaniya agrobiotsenozov Nizhnego Povolzhya : dis. ... d-ra s.-kh. nauk* [Optimization of the Phytosanitary State of the Lower Volga Region Agrobiocenoses. Dr. Agriculture sci. diss.]. Saratov, 2009. 453 p.

7. Ivantsova E.A. Problemy i perspektivy upravleniya tverdymi bytovymi otkhodami [Problems and Prospects for Solid Household Waste Management]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 3. Economika. Ecologiya* [Science Journal of Volgograd State University. Global Economic System], 2016, no. 2 (35), pp. 148-159.

8. Kotova I.B., Taktarova Yu.V., Tsavkelova E.A., Egorova M.A., Bubnov I.A., Malakhova D.V., Shirinkina L.I., Sokolova T.G., Bonch-Osmolovskaya E.A. *Mikrobnaya degradatsiya plastika i puti yeye intensifikatsii* [Microbial Degradation of Plastic and Ways to Intensify It]. *Mikrobiologiya* [Microbiology], 2021, vol. 90, no. 6, pp. 627-659. DOI: 10.31857/S0026365621060082

9. Ivantsova E.A., Onistratenko N.V., Holodenko A.V., Tihonova A.A., Novochadov V.V. Snizheniye negativnogo vozdeystviya na agrotsenozy putem upravleniya primykayushchimi prirodno-antropogennymi sistemami [Reducing the Negative Impact on Agrocenoses by Managing Adjacent Natural and Anthropogenic Systems]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 3: Ekonomika. Ekologiya* [Science Journal of Volgograd State University. Global Economic System], 2017, vol. 19, no. 4 (41), pp. 138-146. DOI: https://doi.org/10.15688/jvolsu3.2017.4.15

10. Turova T.P., Sokolova D.Sh., Nazina T.N., Laptev A.B. Sravneniye taksonomicheskogo sostava bakterialnykh obrastaniy, razvivayushchikhsya na poverkhnosti razlichnykh materialov, eksponirovannykh v vodnykh sredakh [Comparison of the Taxonomic Composition of Bacterial Fouling Developing on the Surface of Various Materials Exposed in Aquatic Environments]. *Mikrobiologiya* [Microbiology], 2021, vol. 90, no. 4, pp. 400-412. DOI: 10.31857/S0026365621040182

11. Shevtsov D.A., Ivantsova E.A., Novochadov V.V. Otsenka fitotoksichnosti svetlo-kashtanovoy pochvy pri yeye zagryaznenii syroy neftyu i ispolzovanii biopreparatov-neftedestruktorov [Assessment of the Phytotoxicity of Light Chestnut Soil When It Is Contaminated with Crude Oil and When Using Biopreparations Containing Oildegrading Microorganisms]. *Vestnik Nizhnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Nizhnevartovsk State University], 2025, no. 1 (69), pp. 100-110.

12. Ivantsova E.A., Novochadov V.V., Rulev A.S., Postnova M.V. *Ekobiotekhnologii optimizatsii aridnykh fitotsenozov yugo-vostoka yevropeyskoy chasti Rossii* [Ecobiotechnology Optimization of Arid Phytocenoses in the South-East of the European Part of Russia]. Volgograd, 2019. 76 p.

13. Yoshida S., Hiraga K., Takehana T., Taniguchi I., Yamaji H., Maeda Y., Toyohara K., Miyamoto K., Kimura Y., Oda K. A Bacterium That Degrades and Assimilates Poly (Ethylene Terephthalate). *Science*, 2016, vol. 351, no. 6278, pp. 1196-1199. DOI: 10.1126/science.aad6359

14. Zeng C., Ding F., Zhou J., Dong W., Cui Z., Yan X. Biodegradation of Poly(Ethylene Terephthalate) by Bacillus Safensis YX8. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, vol. 24, no. 22, p. 16434. DOI: 10.3390/ijms242216434

15. Deng B., Yue Y., Yang J., Yang M., Xing Q., Peng H., Wang F., Li M., Ma L., Zhai C. Improving the Activity and Thermostability of PETase from Ideonella Sakaiensis Through Modulating Its Post-Translational Glycan Modification. *Communications Biology*, 2023, vol. 6, no. 1, p. 39. DOI: 10.1038/s42003-023-04413-0

16. Ivantsova E.A., Novochadov V.V., Onistratenko N.V., Postnova N.V. Ecological Aspects Phitosanitary Optimization of Arid Agrobiocenoses of the South of Russia. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2017, vol. 23, no. 5, pp. 834-842.

17. Onistratenko N.B., Ivantsova E.A., Denysov A.A., Solodovnicov D.A. Heavy Metals in Suburban Ecosystems of Industrial Centres and Ways of Their Reduction. *Ekologia (Bratislava)*, 2016, vol. 35, no. 3, pp. 205-212.

18. Pires C.S., Costa L., Barbosa S.G., Sequeira J.C., Cachetas D., Freitas J.P., Martins G., Machado A.V., Cavaleiro A.J., Salvador A.F. Microplastics Biodegradation by Estuarine and Landfill Microbiomes. *Microbial Ecology*, 2024. DOI: 10.1007/s00248-024-02399-8

19. Wei R., Zimmermann W. Biocatalysis as a Green Route for Recycling the Recalcitrant Plastic Polyethylene Terephthalate. *Microbial Biotechnology*, 2017, vol. 10, no. 6, pp. 1302-1307. DOI: 10.1111/1751-7915.12714

Information About the Authors

Timofey O. Dyachenko, Student, Department of Biology and Bioengineering, Volgograd State University, Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation, timofej.d.@mail.ru

Andrey Yu. Getmanenko, Senior Lecturer, Department of Biology and Bioengineering, Volgograd State University, Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation, getmanenko@volsu.ru

Информация об авторах

Тимофей Олегович Дьяченко, студент кафедры биологии и биоинженерии, Волгоградский государственный университет, просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация, timofej.d.@mail.ru

Андрей Юрьевич Гетманенко, старший преподаватель кафедры биологии и биоинженерии, Волгоградский государственный университет, просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация, getmanenko@volsu.ru