Вестник Пермского университета. Серия Биология. 2026. Т. 17, вып. 3. С. 326–332.
Bulletin of Perm University. Biology. 2026. Vol. 17, iss. 3. P. 326–332.

МИКРОБИОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 579.26: 579.222
EDN: SZRIPR
http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2026-3-326-332

Характеристика галотолерантного штамма-деструктора фенантрена *Stutzerimonas* sp. 8G4

Ольга Викторовна Ястребова[1], **Анастасия Андреевна Сухановская**[2], **Алексей Владимирович Назаров**[1, 2]

[1] Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН – филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия
[2] Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия
Автор, ответственный за переписку: Ольга Викторовна Ястребова, olyastr@mail.ru

Аннотация. Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) — соединения с двумя или более конденсированными ароматическими кольцами, обладающие гидрофобностью, токсичностью, устойчивостью к разложению, и представляющие угрозу для здоровья человека. Ведущую роль в трансформации и утилизации ПАУ в окружающей среде играют микроорганизмы. Из почвы на территории Верхнекамского месторождения солей (г. Соликамск, Пермский край) выделен грамотрицательный штамм-деструктор фенантрена 8G4, идентифицированный на основании анализа гена 16S рРНК как представитель рода *Stutzerimonas.* Штамм способен к росту на нафталине, салицилате и бензоате в качестве субстратов, и не растет на *орто*-фталате, на основании чего сделано предположение, что деградация фенантрена штаммом возможна с образованием 1-гидрокси-2-нафтойной кислоты, салицилата и катехола в качестве ключевых метаболитов. Установлено, что штамм способен к росту в среде без добавления соли, а также в присутствии до 9% NaCl в полноценной среде и до 7% NaCl в минеральной среде с фенантреном в качестве субстрата. Наиболее высокое значение максимальной оптической плотности культуры при выращивании на фенантрене зафиксировано в среде, содержащей 3% NaCl. В опыте с отмытыми клетками показано, что штамм 8G4 утилизирует 99.2% фенантрена в среде без добавления соли, и 81.2% фенантрена в среде, содержащей 7% NaCl. Штамм *Stutzerimonas* sp. 8G4 является перспективным для дальнейших исследований и разработки новых биотехнологий очистки загрязненных ПАУ почв и промышленных стоков.

Ключевые слова: *Stutzerimonas*, фенантрен, биодеградация, NaCl

Для цитирования: Ястребова О. В., Сухановская А. А., Назаров А. В. Характеристика галотолерантного штамма-деструктора фенантрена *Stutzerimonas* sp. 8G4 // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2026. Т. 17, вып. 3. С. 326–332. http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2026-3-326-332.

Финансирование: исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 124020500028-4).

MICROBIOLOGY

Original article

Characterization of the halotolerant phenanthrene-degrading strain *Stutzerimonas* sp. 8G4

Olga V. Yastrebova[1], **Anastasia A. Sukhanovskaya**[2], **Aleksey V. Nazarov**[1, 2]

[1] Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – branch of the Perm Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia
[2] Perm State University, Perm, Russia
Corresponding author: Olga V. Yastrebova, olyastr@mail.ru

Abstract. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are compounds with two or more condensed aromatic rings, that are hydrophobic, toxic, resistant to degradation, and pose a threat to human health. Microorganisms play a leading role in the transformation and utilization of PAHs in the environment. Phenanthrene-degrading strain 8G4 was isolated from soil in the Verkhnekamskoye salt deposit (Solikamsk, Perm Krai). Based on 16S rRNA gene analysis, the strain was identified as a member of the genus *Stutzerimonas*. The strain is capable of growth on naphthalene, salicylate, and benzoate as substrates, but does not grow on *ortho*-phthalate. This sug-

© Ястребова О. В., Сухановская А. А., Назаров А. В., 2026

gests that phenanthrene degradation by the strain is possible with the formation of 1-hydroxy-2-naphthoic acid, salicylate, and catechol as key metabolites. The strain was found to be capable of growth in a salt-free medium, as well as in the presence of up to 9% NaCl in a complete medium, and up to 7% NaCl in a mineral medium with phenanthrene as a substrate. The highest value of the maximum optical density of the culture, when grown on phenanthrene, was recorded in a medium containing 3% NaCl. An experiment with washed cells showed that strain 8G4 utilized 99.2% of phenanthrene in a medium without NaCl and 81.2% of it in a medium containing 7% NaCl, which has not previously been demonstrated for bacteria of the genus *Stutzerimonas*. Strain *Stutzerimonas* sp. 8G4 holds promise for further research and the development of new biotechnologies for the treatment of PAH-contaminated soils and industrial wastewater.

Keywords: *Stutzerimonas*, phenanthrene, biodegradation, NaCl

For citation: Yastrebova O. V., Sukhanovskaya A. A., Nazarov A. V. [Characterization of the halotolerant phenanthrene-degrading strain *Stutzerimonas* sp. 8G4]. *Bulletin of the Perm University. Biology*. Vol. 17, iss. 3 (2026): pp. 326-332. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2026-3-326-332.

Financing: this study was conducted within the framework of a state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. 124020500028-4).

Введение

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) – стойкие, неполярные соединения, состоящие из 2-х или более конденсированных ароматических колец. Данные соединения обладают высокой токсичностью, мутагенными и генотоксичными свойствами, а также способностью к накоплению в пищевых цепях. ПАУ являются распространенными загрязнителями окружающей среды. Образование ПАУ возможно в результате природных процессов (лесных и пастбищных пожаров), либо антропогенной деятельности, такой как неполное сгорание различных видов топлива, выхлопные газы автомобилей, а также из-за использования на сельскохозяйственных угодьях пестицидов и инсектицидов [Zhong et al., 2011; Davletgildeeva, Kuznetsov, 2024]. Присутствие ПАУ в окружающей среде отслеживается Агентством по охране окружающей среды США (USEPA), 16 ПАУ, включая фенантрен и антрацен, были определены как приоритетные загрязнители [Moscoso et al., 2012]. В окружающей среде ПАУ могут подвергаться абиотической деградации вследствие фотолитического и химического окисления, при котором образуется ряд токсичных продуктов, однако основную роль в утилизации данных соединений играет микробная деструкция. К настоящему времени описаны бактерии различных филогенетических групп, а также их сообщества, осуществляющие частичную трансформацию или утилизацию низкомолекулярных (нафталин, фенантрен, антрацен) и высокомолекулярных (бензпирен) ПАУ [Huang et al., 2023; Das et al., 2026].

Фенантрен, трициклический ароматический углеводород, часто рассматривается в качестве модельного соединения для изучения биодеградации ПАУ. В настоящее время хорошо изучены пути аэробного разложения фенантрена микроорганизмами, среди которых преобладают грамотрицательные бактерии родов *Pseudomonas, Stenotrophomonas, Alcaligenes, Sphingomonas* [Zhao, Wong, 2009; Deveryshetty, Phale, 2010; Moscoso et al., 2012; Davletgildeeva, Kuznetsov, 2024]. В большинстве случаев гидроксилирование фенантрена катализируется диоксигеназой, затем следует мета-расщепление и образование 1-гидрокси-2-нафтойной кислоты, которая далее разлагается по пути образования или салициловой, или фталевой кислот [Deveryshetty, Phale, 2010; Li et al., 2024].

Род *Stutzerimonas*, реклассифицированный ранее из рода *Pseudomonas*, включает грамотрицательные бактерии, отличающиеся метаболической универсальностью и адаптивностью к различным условиям среды [Gomila et al., 2022; Lalucat et al., 2022]. Бактерии рода *Stutzerimonas* выделены из активного ила, засоленных и нефтезагрязненных почв, поверхностных морских вод и морских отложений [Zhang et al., 2015; Gomila et al., 2022; Xu et al., 2022; Zhao et al., 2024]. Из немногочисленных сообщений известна способность штаммов рода к деградации ПАУ, в частности фенантрена и нафталина [Fu et al., 2023; Mulet et al., 2023; Guo et al., 2025].

Высокая концентрация солей, присутствующая в ряде природных и антропогенных экосистем, влияет на выживаемость и метаболическую активность бактерий, снижает биодоступность и эффективность бактериального разложения ПАУ [Rojas-Vargas, Castel an-Sanchez H., Pardo-Lopez, 2023]. Способность галотолерантных бактерий к утилизации ПАУ, в частности фенантрена, в условиях засоления среды описана в немногочисленных сообщениях и требует дальнейшего изучения.

Цель исследования – изучение свойств выделенного нами галотолерантного бактериального штамма-деструктора фенантрена.

Материалы и методы

Объект исследования – бактериальный штамм, выделенный из образца почвы, отобранной на расстоянии 8 м от солеотвала предприятия Соликамского калийного рудоуправления 1 (СКРУ 1) ПАО

«Уралкалий» (г. Соликамск, Пермский край) на территории промышленных разработок Верхнекамского месторождения солей. Штамм выделен методом накопительного культивирования в минеральной среде Раймонда (МСР) [Raymond, 1961], с использованием образца почвы, добавлением NaCl (3%) и фенантреном (1.0 г/л) в качестве субстрата.

Среды и условия культивирования. Богатую среду Раймонда (БСР) готовили добавлением в минеральную среду Раймонда (МСР) 2.5 г/л дрожжевого экстракта ("Biospringer", Франция) и 5 г/л триптона ("VWR Life Science Amresco", США). В МСР в качестве субстратов использовали фенантрен, нафталин, *орто*-фталевую кислоту (ОФК), протокатеховую кислоту (ПКК), бензоат ("Fluka", США) в концентрации 1.0 г/л.

Идентификация бактерий. Выделение ДНК из чистой культуры бактерий проводили общепринятым методом [Ausbel et al., 1995]. Амплификация гена 16S рРНК проведена с использованием бактериальных праймеров 27F и 1492R на приборе My Cycler "Bio-Rad Laboratories" (США) согласно [Lane, 1991]. Анализ полученных нуклеотидных последовательностей 16S рДНК проводили с использованием программ Sequence Scanner v 2.0, CLUSTAL W (http://www.ebi.ac.uk/clustalw). Поиск гомологичных последовательностей осуществляли по базам данных GenBank (http://www.ncbi.nlm.nih.gov) и EzTaxon (http://www.eztaxon.org).

Рост штамма при различных концентрациях NaCl изучали при периодическом культивировании в жидкой среде МСР без NaCl и при концентрациях 3, 5, 7% соли, с добавлением фенантрена (1.0 г/л) в качестве субстрата. Оптическую плотность (ОП) культуры определяли на спектрофотометре UV-Visible BioSpec-mini ("Shimadzu", Япония) при длине волны 600 нм.

Оценку разложения фенантрена осуществляли методом газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС). Экстракцию фенантрена и анализ проводили как описано [Ястребова и др., 2025]. Расчет удельной скорости роста (μ, $ч^{-1}$) и удельной скорости утилизации (μ, $сут^{-1}$) проводили в соответствии с [Нетрусов, 2005].

Статистическая обработка результатов. Все эксперименты были выполнены в трехкратной повторности. Полученные данные обрабатывали с использованием программы Microsoft Excel 2007.

Результаты

Штамм *Stutzerimonas* sp. 8G4 выделен из образца ризосферной почвы, отобранного вблизи солеотвала (г. Соликамск, Пермский край) методом накопительного культивирования в МСР в присутствии 3% NaCl, с фенантреном в качестве субстрата. На основании секвенирования и биоинформационного анализа гена 16S рРНК штамм идентифицирован как представитель рода *Stutzerimonas,* близкородственный типовому штамму *Stutzerimonas kunmingensis* HL22-2^T (уровень сходства по гену 16S рРНК составлял 99.69%). Штамм 8G4 при росте на агаризованной среде БСР имел бежевые, непрозрачные, выпуклые колонии с неровным краем. Клетки грамотрицательные, палочковидные, подвижные, оксидазо- и каталазоположительные. Штамм 8G4 имел оптимум роста при pH 7.0–7.5 и 28°C.

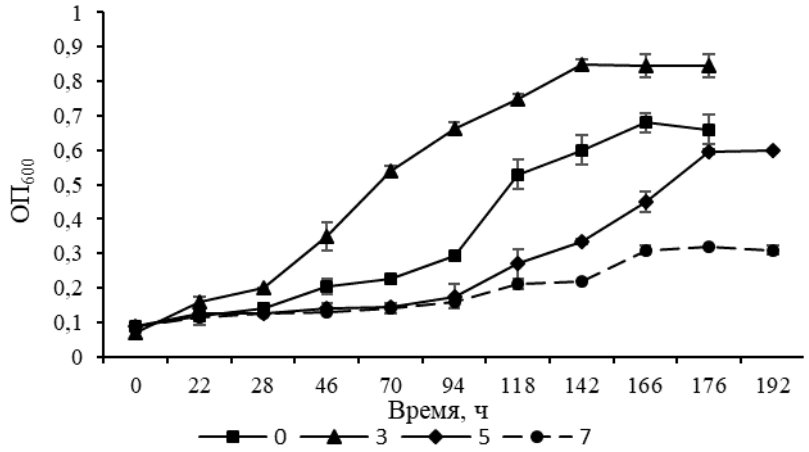
Установлено, что штамм 8G4 способен к росту в минеральной среде на фенантрене, салицилате, бензоате и к слабому росту на нафталине и катехоле. Штамм не рос на *орто*-фталате, бифениле в качестве субстрата. На основании данных характеристик можно предположить, что деградация фенантрена штаммом 8G4 может идти по пути образования 1-гидрокси-2-нафтойной кислоты, салицилата и катехола в качестве ключевых метаболитов, как было показано ранее для штаммов *Stutzerimonas frequens* SL-6 [Guo et al., 2025] и *Pseudomonas stutzeri* LH-42 [Fu et al., 2023].

Поскольку штамм 8G4 выделен из района солеразработок методом накопительной культуры с повышенным засолением среды, исследована способность штамма к росту и деструкции фенантрена в присутствии высокой концентрации NaCl в среде культивирования. Установлено, что штамм 8G4 растет в полноценной среде как без добавления соли, так и в присутствии до 9% NaCl, что позволяет отнести штамм к галотолерантным микроорганизмам по классификации Кашнера [Кашнер, 1981].

Исследована способность штамма 8G4 к росту при повышенной концентрации NaCl в МСР с фенантреном в качестве единственного источника углерода и энергии (рисунок).

Наиболее высокое максимальное значение оптической плотности ($ОП_{600}$ = 0.85) и наименьшая продолжительность *lag*-фазы роста культуры зафиксированы в среде, содержащей 3% NaCl, что превышало параметры роста культуры в среде без добавления соли. С повышением концентрации NaCl в среде до 5% показано снижение накопления биомассы ($ОП_{600}$ = 0.59) и увеличение продолжительности подготовительной фазы роста штамма (см. рисунок). Значения удельной скорости роста в среде без добавления соли (μ = 0.012±0.001 $ч^{-1}$) и в среде, содержащей до 5% NaCl (μ = 0.014±0.002 $ч^{-1}$) существенно не менялись. В присутствии 7% соли в среде наблюдалось значительное снижение значений оптической плотности и удельной скорости роста культуры (рисунок, табл. 1).

Изучена утилизация фенантрена штаммом 8G4 в концентрации 200 мг/л в опыте с отмытыми клетками (табл. 2).



Рост штамма *Stutzerimonas* sp. 8G4 на фенантрене при различных концентрациях NaCl (%)
[Growth of strain *Stutzerimonas* sp. 8G4 on phenanthrene at various NaCl concentrations (%)]

Таблица 1

Параметры роста штамма 8G4 в МСР с фенантреном (1.0 г/л) при разных концентрациях NaCl
[Growth parameters of the strain 8G4 in MMR and (1.0 g/L) at different concentrations of NaCl]

Концентрация NaCl, %	Удельная скорость роста, $ч^{-1}$	Максимальное значение $ОП_{600}$
Без NaCl	0.012±0.001	0.68
3	0.011±0.001	0.85
5	0.014±0.002	0.59
7	0.009±0.001	0.32

Таблица 2

Разложение фенантрена (%) штаммом *Stutzerimonas* sp. 8G4
[Decomposition phenanthrene (%) by strain *Stutzerimonas* sp. 8G4]

NaCl (%)	Время (сут)				Удельная скорость утилизации (μ, $сут^{-1}$)
	1	3	4	5	
Без NaCl	43.37±0.1	50.85±1.2	98.6±3.0	99.2±0.5	0.80
3	42.99±8.9	63.2±3.7	83.25±4.1	99.05±1.1	0.77
5	41.57±4.2	78.61±0.9	86.0±1.8	98.95±0.6	0.75
7	24.08±2.1	22.34±3.1	56.2±1.5	81.2±2.5	0.27

Примечание: μ ($сут^{-1}$) – удельная скорость утилизации.

Установлено, что в среде без добавления соли утилизация фенантрена штаммом составляла 99.2% к 102 ч культивирования. Добавление NaCl в концентрации до 5% в среду культивирования существенно не снижало уровень деградации фенантрена и составляло 98.9%. Увеличение концентрации NaCl до 7% приводило к снижению степени утилизации фенантрена штаммом до 81.2% к 102 ч культивирования.

Из литературы известна способность штаммов рода *Stutzerimonas* к утилизации ряда ксенобиотиков, в том числе ПАУ. Описаны штаммы *Stutzerimonas frequens* SL-6 и *Pseudomonas stutzeri* LH-42, способные к деградации фенантрена, и штамм *Stutzerimonas decontaminans* 19SMN4, имеющий гены утилизации нафталина [Fu et al., 2023; Mulet et al., 2023; Guo et al., 2025]. Консорциум из трех штаммов бактерий, *Pseudomonas stutzeri* MP6, *Stutzerimonas stutzeri* MP15 и *Stutzerimonas frequens* MP37, утилизировал 85.6% смеси ПАУ в течение 90 дней в условиях, имитирующих окружающую среду [Parmar et al., 2026]. Также описана утилизация дибутилфталата (ДБФ) штаммом SJ1gcor в присутствии до 7% соли в минеральной среде [Нечаева и др., 2025]. Однако к настоящему времени в литературе не представлено исследование утилизации фенантрена бактериями рода *Stutzerimonas* в условиях повышенного засоления среды. Выделенный нами штамм 8G4 способен к эффективной утилизации фенантрена в присутствии до 7% NaCl.

Заключение

Выделенный нами из почвы на территории Верхнекамского месторождения солей (г. Соликамск, Пермский край) грамотрицательный штамм-деструктор фенантрена 8G4 идентифицирован как представитель рода *Stutzerimonas*. На основании субстратной специфичности сделано предположение, что дегра-

дация фенантрена штаммом 8G4 возможна с образованием 1-гидрокси-2-нафтойной кислоты, салицилата и катехола в качестве ключевых метаболитов, как показано в литературе для штаммов данного рода [Fu et al., 2023; Guo et al., 2025]. Установлено, что штамм является галотолерантным и способен к росту и эффективной утилизации фенантрена в присутствии до 7% NaCl в среде культивирования, что ранее не было показано для штаммов рода *Stutzerimonas*. В результате исследований физиологических и деградационных свойств штамма *Stutzerimonas* sp. 8G4 показан высокий биодеградативный потенциал и перспективность использования штамма для разработки эффективных биотехнологий очистки загрязненных ПАУ почв и промышленных стоков.

Список источников

1. Кашнер Д. Жизнь микробов в экстремальных условиях М.: Мир, 1981. 365 с.
2. Нетрусов А.И. Практикум по микробиологии. М.: Академия, 2005. 608 с.
3. Нечаева Ю.И., Пьянкова А.А., Плотникова Е.Г. Штамм-деструктор фталатов *Stutzerimonas* sp. SJ1gcor из почвы береговой зоны техногенного галощелочного водоема // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2025. Вып. 4. С. 415–423. DOI: 10.17072/1994-9952-2025-4-415-423. EDN: WLINVR.
4. Ястребова О.В. и др. Деструкция дибутилфталата галотолерантным штаммом *Pseudarthrobacter* sp. NKDBFgelt // Прикладная биохимия и микробиология. 2025. Т. 61, № 3. С. 579–588. DOI: 10.31857/S0555109925030064. EDN: NDNLWA.
5. Ausbel F.M. Short Protocols in Molecular Biology. 3rd ed. N.Y.: John Wiley & Sons, 1995. 450 p.
6. Das A. et al. Next-generation multi-omics and systems biology strategies for bacterial polyaromatic-hydrocarbon biodegradation // Total Environmental Microbiology. 2026. Vol. 2, iss. 3. DOI: 10.1016/j.temicr.2026.100097
7. Davletgildeeva A.T., Kuznetsov N.A. Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons by means of bacteria and bacterial enzymes // Microorganisms. 2024. Vol. 12. Art. 1814. DOI: 10.3390/microorganisms12091814. EDN: THLFBG.
8. Deveryshetty J., Phale P. Biodegradation of phenanthrene by *Alcaligenes* sp. strain PPH: partial purification and characterization of 1-hydroxy-2-naphthoic acid hydroxylase // FEMS Microbiology Letters. 2010. Vol. 311. P. 93–101. DOI: 10.1111/ j.1574-6968.2010.02079.x. EDN: MYZYAJ.
9. Fu Q. et al. Transcriptome analysis reveals phenanthrene degradation strategy of *Pseudomonas stutzeri LH-42* // 3 Biotech. 2023. Vol. 13. Art. 65. DOI: 10.1007/s13205-023-03473-7. EDN: DIMZTD.
10. Gomila M. et al. Genome-Based Taxonomy of the Genus *Stutzerimonas* and proposal of *S. frequens* sp. nov. and *S. degradans* sp. nov. and Emended Descriptions of *S. perfectomarina* and *S. chloritidismutans* // Microorganisms. 2022. Vol. 10. Art. 1363. DOI: 10.3390/microorganisms10071363. EDN: JWRSUM.
11. Guo L. et al. Insights into mechanism of 1-hydroxy-2-naphthoic acid accumulation during phenanthrene degradation by *Stutzerimonas frequens* SL-6 // International Biodeterioration & Biodegradation. 2025. Vol. 198. Art. 105975. DOI: 10.1016/j.ibiod.2024.105975. EDN: SLCUYU.
12. Huang Y. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) biodegradation capacity revealed by a genome-function relationship approach // Environmental Microbiome. 2023. Vol. 18, iss. 1. Art. 39. DOI: 10.1186/s40793-023-00497-7. EDN: YDMSXU.
13. Lalucat J. et al. Past, present and future of the boundaries of the *Pseudomonas* genus: proposal of *Stutzerimonas* gen. nov. // Systematic and Applied Microbiology. 2022. Vol. 45. Art. 126289. DOI: 10.1016/j.syapm.2021.126289. EDN: SWNWUX.
14. Lane D.J. 16S/23S rRNA sequencing // Nucleic acid techniques in bacterial systematics. N.Y.: Wiley, 1991. P. 115−175.
15. Li J. et al. Identification of an efficient phenanthrene-degrading *Pseudarthrobacter* sp. L1SW and characterization of its metabolites and catabolic pathway // Journal of Hazardous Materials. 2024. Vol. 465. Art. 133138. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.133138. EDN: UUIKWZ.
16. Moscoso F. et al. Technoeconomic assessment of phenanthrene degradation by *Pseudomonas stutzeri* CECT 930 in a batch bioreactor // Bioresource Technology. 2012. Vol. 104. P. 81–89. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.10.053
17. Mulet M. et al. *Stutzerimonas decontaminans* sp. nov. isolated from marine polluted sediments // Systematic and Applied Microbiology. 2023. Vol. 46. Art. 126400. DOI: 10.1016/j.syapm.2023.126400. EDN: FTMGYL.
18. Parmar M. et al. A hybrid approach utilising adaptive laboratory evolution and gene expression analysis: How adaptive evolution improves PAHs biodegradation // Journal of Environmental Management. 2026. Vol. 406. Art. 129837. DOI: 10.1016/j.jenvman.2026.129837.
19. Raymond R.L. Microbial oxidation of *n*-paraffinic hydrocarbons // Developments in Industrial Microbiology. 1961. Vol. 2(1). P. 23−32.

20. Rojas-Vargas J., Castel an-Sanchez H.G., Pardo-Lopez L. HADEG: a curated hydrocarbon aerobic degradation enzymes and genes database // Computational Biology and Chemistry. 2023. Vol. 107. Art. 107966. DOI: 10.1016/j.compbiolchem.2023.107966. EDN: OKXKZN.

21. Xu W. et al. Bacterial communities and culturable petroleum hydrocarbon degrading bacteria in marine sediments in the northeastern South China Sea // Frontiers in Environmental Sciences. 2022. Vol. 10. Art. 865636. DOI: 10.3389/fenvs.2022.865636. EDN: AQHDDS.

22. Zhang L. et al. *Pseudomonas zhaodongensissp*. nov., isolated from saline and alkaline soils // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2015. Vol. 65(3). P. 1022−1030. DOI: 10.1099/ijs.0.000057. EDN: UTLPNL.

23. Zhao Z. et al. Diversity and potential metabolic characteristics of culturable copiotrophic bacteria that can grow on low-nutrient medium in Zhenbei Seamount in the South China Sea // Microbial Ecology. 2024. Vol. 87. Art. 157. DOI: 10.1007/s00248-024-02475-z. EDN: DVXPYJ.

24. Zhao Z., Wong J. Biosurfactants from *Acinetobacter calcoaceticus* BU03 enhance the solubility and biodegradation of phenanthrene // Environmental Technology. 2009. Vol. 30. P. 291–299. DOI: 10.1080/09593330802630801. EDN: MEDFKZ.

25. Zhong Y. et al. Production of metabolites in the biodegradation of phenanthrene, fluoranthene and pyrene by the mixed culture of *Mycobacterium* sp. and *Sphingomonas* sp. // Bioresource Technology. 2011. Vol. 102. P. 2965–2972. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.09.113.

References

1. Kashner D. *Zhizn' mikrobov v ekstremal'nykh usloviyakh* [Life of microbes in extreme conditions]. Moscow, Mir Publ., 1981. 365 p. (In Russ.).

2. Netrusov A.I. *Praktikum po mikrobiologii* [Practicum on microbiology]. Moscow, Akademija Publ., 2005. 608 p. (In Russ.).

3. Nechaeva Y.I., Pyankova A.A., Plotnikova E.G. [Phthalate-degrading strain *Stutzerimonas* sp. SJ1gcor from the soil of the coastal zone of a man-made haloalkaline reservoir]. *Bulletin of Perm University. Biology*. Iss. 4 (2025): pp. 415-423. DOI: 10.17072/1994-9952-2025-4-415-423. EDN: WLINVR.

4. Yastrebova O.V. et al. [Destruction of dibutyl phthalate by a halotolerant strain of *Pseudarthrobacter* sp. NKDBFgelt]. *Applied Biochemistry and Microbiology.* V. 61 No. 3 (2025): pp. 579-588. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0555109925030064. EDN: NDNLWA.

5. Ausbel F.M. Short Protocols in Molecular Biology. 3rd ed. N.Y., John Wiley & Sons, 1995. 450 p.

6. Das A. et al. Next-generation multi-omics and systems biology strategies for bacterial polyaromatic-hydrocarbon biodegradation *Total Environ. Microbiol*. V. 2, Iss. 3 (2026). DOI: 10.1016/j.temicr.2026.100097.

7. Davletgildeeva A.T., Kuznetsov N.A. Bioremediation of Polycyclic aromatic hydrocarbons by means of bacteria and bacterial enzymes *Microorganisms.* V. 12 (2024). Art. 1814. DOI: 10.3390/microorganisms12091814. EDN: THLFBG.

8. Deveryshetty J., Phale P. Biodegradation of phenanthrene by *Alcaligenes* sp. strain PPH: partial purification and characterization of 1-hydroxy-2-naphthoic acid hydroxylase *FEMS Microbiol. Lett.* V. 311 (2010): pp. 93-101. DOI: 10.1111/ j.1574-6968.2010.02079.x. EDN: MYZYAJ.

9. Fu Q. et al. Transcriptome analysis reveals phenanthrene degradation strategy of *Pseudomonas stutzeri LH-42*. *3 Biotech.* V. 13 (2023). Art. 65. DOI: 10.1007/s13205-023-03473-7. EDN: DIMZTD.

10. Gomila M. et al. Genome-Based Taxonomy of the Genus *Stutzerimonas* and proposal of *S. frequens* sp. nov. and *S. degradans* sp. nov. and Emended Descriptions of *S. perfectomarina* and *S. chloritidismutans. Microorganisms*. V. 10 (2022). Art. 1363. DOI: 10.3390/microorganisms10071363. EDN: JWRSUM.

11. Guo L. et al. Insights into mechanism of 1-hydroxy-2-naphthoic acid accumulation during phenanthrene degradation by *Stutzerimonas frequens* SL-6. *International Biodeterioration & Biodegradation.* V. 198 (2025). Art. 105975. DOI: 10.1016/j.ibiod.2024.105975. EDN: SLCUYU.

12. Huang Y., et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) biodegradation capacity revealed by a genome-function relationship approach *Environ. Microbiome.* V. 18, iss. 1 (2023). Art. 39. DOI: 10.1186/s40793-023-00497-7. EDN: YDMSXU.

13. Lalucat J. et al. Past, present and future of the boundaries of the *Pseudomonas* genus: proposal of *Stutzerimonas* gen. nov. *Syst. Appl. Microbiol.* V. 45 (2022). Art. 126289. DOI: 10.1016/j.syapm.2021.126289. EDN: SWNWUX.

14. Lane D.J. 16S/23S rRNA sequencing. *Nucleic acid techniques in bacterial systematics.* N.Y., Wiley, 1991, pp. 115-175.

15. Li J. et al. Identification of an efficient phenanthrene-degrading *Pseudarthrobacter* sp. L1SW and characterization of its metabolites and catabolic pathway *J. Hazard. Materials.* V. 465 (2024). Art. 133138. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.133138. EDN: UUIKWZ.

16. Moscoso F. et al. Technoeconomic assessment of phenanthrene degradation by *Pseudomonas stutzeri* CECT 930 in a batch bioreactor *Bioresource Technology*. V. 104 (2012): pp. 81-89. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.10.053

17. Mulet M. et al. *Stutzerimonas decontaminans* sp. nov. isolated from marine polluted sediments. *Systematic and Applied Microbiology*. V. 46 (2023). Art. 126400. DOI: 10.1016/j.syapm.2023.126400. EDN: FTMGYL.

18. Parmar M. et al. A hybrid approach utilising adaptive laboratory evolution and gene expression analysis: How adaptive evolution improves PAHs biodegradation // *Journal of Environmental Management* V. 406 (2026). Art. 129837. DOI: 10.1016/j.jenvman.2026.129837.

19. Raymond R.L. Microbial oxidation of *n*-paraffinic hydrocarbons. *Developments in Industrial Microbiology*. V. 2(1) (1961): pp. 23-32.

20. Rojas-Vargas J. et al. HADEG: a curated hydrocarbon aerobic degradation enzymes and genes database. *Comput. Biol. Chem.* V. 107 (2023). Art. 107966. DOI; 10.1016/j.compbiolchem. 2023.107966. EDN: OKXKZN.

21. Xu W. et al. Bacterial communities and culturable petroleum hydrocarbon degrading bacteria in marine sediments in the northeastern South China Sea. *Frontiers in Environmental Sciences.* V. 10 (2022). Art.865636. DOI:10.3389/fenvs.2022.865636. EDN: AQHDDS.

22. Zhang L. et al. *Pseudomonas zhaodongensissp*. nov., isolated from saline and alkaline soils. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology.* V. 65(Pt 3) (2015): pp. 1022-1030. DOI: 10.1099/ijs.0.000057. EDN: UTLPNL.

23. Zhao Z. et al. Diversity and potential metabolic characteristics of culturable copiotrophic bacteria that can grow on low-nutrient medium in Zhenbei Seamount in the South China Sea. *Microbial Ecology*. V. 87 (2024). Art. 157. DOI: 10.1007/s00248-024-02475-z. EDN: DVXPYJ.

24. Zhao Z., Wong J. Biosurfactants from *Acinetobacter calcoaceticus* BU03 enhance the solubility and biodegradation of phenanthrene. *Environ. Technol.* V. 30 (2009): pp. 291-299. doi: 10.1080/09593330802630801. EDN: MEDFKZ.

25. Zhong, Y. et al. Production of metabolites in the biodegradation of phenanthrene, fluoranthene and pyrene by the mixed culture of *Mycobacterium* sp. and *Sphingomonas* sp. *Bioresour. Technol.* V. 102 (2011): pp. 2965-2972. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.09.113.

Статья поступила в редакцию 26.06.2026; одобрена после рецензирования 29.07.2026; принята к публикации 06.10.2026.
The article was submitted 26.06.2026; approved after reviewing 29.07.2026; accepted for publication 06.10.2026.

Информация об авторах
О. В. Ястребова – olyastr@mail.ru, канд. биол. наук, научный сотрудник;
А. А. Сухановская – a.sukhanovskaya@yandex.ru, студент;
А. В. Назаров – nazarov@iegm.ru, канд. биол. наук, старший научный сотрудник, доцент.
Information about the authors
O. V. Yastrebova – olyastr@mail.ru, PhD, researcher;
A. A. Sukhanovskaya – a.sukhanovskaya@yandex.ru, student at Perm State University;
A. V. Nazarov – nazarov@iegm.ru, PhD, senior researcher at IEGM UB RAS; associate professor at Perm State University.

Вклад авторов:
Ястребова О. В. – концепция исследования; экспериментальная работа; написание исходного текста.
Сухановская А. А. – экспериментальная работа; статистическая обработка материала.
Назаров А. В. – экспериментальная работа; доработка текста.
Contribution of the authors:
Yastrebova O. V. – research concept; experimental work; writing the original text.
Sukhanovskaya A. A. – experimental work; statistical analysis of the material.
Nazarov A. V. – experimental work; text revision.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.