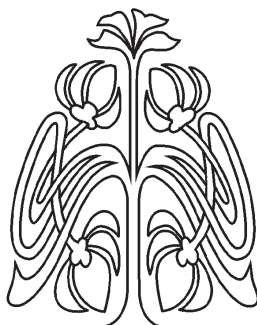
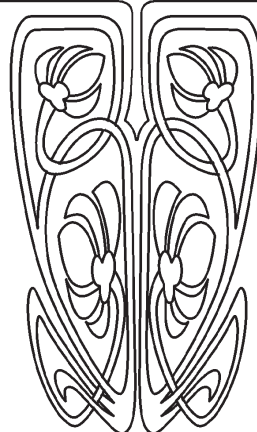




## ЭКОЛОГИЯ



НАУЧНЫЙ  
ОТДЕЛ



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 208–216

*Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 208–216

<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-2-208-216>

EDN: ROQCVF

Научная статья

УДК 579.266.6:504.53.054

### Эколого-функциональные свойства углеводородоокисляющих бактерий, изолированных из почв города Когалыма

Е. В. Плешакова<sup>1</sup>, Е. В. Глинская<sup>1</sup>, А. С. Коробейникова<sup>1</sup>,  
Д. М. Голубев<sup>1</sup>✉, Э. Д. Казакулов<sup>1</sup>, М. В. Решетников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

<sup>2</sup>Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть», Россия, 628486, г. Когалым, ул. Центральная, д. 19/17

Плешакова Екатерина Владимировна, доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры биохимии и биофизики, [plekat@yandex.ru](mailto:plekat@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3836-0258>

Коробейникова Анастасия Сергеевна, студент кафедры микробиологии и физиологии растений биологического факультета, [korobeinikovaanastasija@yandex.ru](mailto:korobeinikovaanastasija@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3157-693X>

Глинская Елена Владимировна, кандидат биологических наук, доцент кафедры микробиологии и физиологии растений, [elenavg-2007@yandex.ru](mailto:elenavg-2007@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1675-5438>

Голубев Дмитрий Михайлович, студент кафедры микробиологии и физиологии растений биологического факультета, [dimagolubev2018@yandex.ru](mailto:dimagolubev2018@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9471-6066>

Казакулов Эдуард Даниялович, студент кафедры биохимии и биофизики биологического факультета, [kazakuloved@gmail.com](mailto:kazakuloved@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0007-4235-3663>

Решетников Михаил Владимирович, начальник отдела минералогических исследований Управления комплексных исследований ядра Центра исследования ядра и пластовых флюидов, [rnmv85@list.ru](mailto:rnmv85@list.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8298-029X>

**Аннотация.** Установлено, что городские почвы одного из основных нефтегазоносных регионов России, расположенного в районе Крайнего Севера (г. Когалым, ХМАО – Югра) являются источником бактерий-деструкторов нефти. Произведена количественная оценка деструктивной и эмульгирующей активности бактерий: *Bacillus alcalophilus* WS-3027B, *B. funiculus* LY-2403G, *B. halodurans* MH-3011N, *B. niacini* TC-8101S, *B. psychrodurans* LV-1106E и *Curtobacterium flaccumfaciens* AE-0851V по отношению к нефти. Максимальная степень деструкции нефти за 14 сут. обнаружена у бактерий: *B. niacini* TC-8101S (39,8%) и *B. halodurans* MH-3011N (36,0%). Максимальная эндогенная ( $E_{24}=70,0$  и 53,0%;  $E_{48}=68,7$  и 62,0%) и экзогенная ( $E_{24}=74,0$  и 58,6%;  $E_{48}=74,0$  и 54,0%) эмульгирующая активность выявлена у бактерий *B. alcalophilus* WS-3027B и *B. funiculus* LY-2403G. На основании обнаруженных у бактерий способностей к деструкции и эмульгации нефти, высоких адаптационных свойств к пониженной температуре, повышенной минерализации, щелочности среды рекомендовано использование данных бактерий для биоремедиации загрязненных почв в условиях Крайнего Севера.

**Ключевые слова:** нефть, углеводородоокисляющие бактерии, деструктивная активность, эмульгирующая активность, *Bacillus*, адаптационные свойства



**Для цитирования:** Плешакова Е. В., Глинская Е. В., Коробейникова А. С., Голубев Д. М., Казакулов Э. Д., Решетников М. В. Эколого-функциональные свойства углеводородокисляющих бактерий, изолированных из почв города Когалыма // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 208–216. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-2-208-216>, EDN: ROQCVP

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

## Ecological and functional properties of hydrocarbon-oxidizing bacteria isolated from the soils of Kogalym city

E. V. Pleshakova<sup>1</sup>, E. V. Glinskaya<sup>1</sup>, A. S. Korobeynikova<sup>1</sup>, D. M. Golubev<sup>1</sup>✉, E. D. Kazakulov<sup>1</sup>, M. V. Reshetnikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

<sup>2</sup> Branch of LUKOIL-Engineering LLC, PermNIPIneft, 19/17 Tsentralnaya St., Kogalym 628486, Russia

Ekaterina V. Pleshakova, plekat@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3836-0258>

Elena V. Glinskaya, elenavg-2007@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1675-5438>

Anastasia S. Korobeynikova, korobeinikovaanastasija@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3157-693X>

Dmitry M. Golubev, dimagolubev2018@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9471-6066>

Eduard D. Kazakulov, kazakuloved@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-4235-3663>

Mikhail V. Reshetnikov, rmv85@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8298-029X>

**Abstract.** It has been established that urban soils of one of the major oil-and-gas producing regions of Russia, located in the Far North (Kogalym, Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra), serve as a source of oil-degrading bacteria. A quantitative assessment was made of the degradative and emulsifying activity of the bacteria *Bacillus alcalophilus* WS-3027B, *B. funiculus* LY-2403G, *B. halodurans* MH-3011N, *B. niacini* TC-8101S, *B. psychrodurans* LV-1106E, and *Curtobacterium flaccumfaciens* AE-0851V with respect to oil. The maximum degree of oil degradation over 14 days was observed in the bacteria *B. niacini* TC-8101S (39.8%) and *B. halodurans* MH-3011N (36.0%). The highest endogenous ( $E_{24} = 70.0$  and 53.0%;  $E_{48} = 68.7$  and 62.0%) and exogenous ( $E_{24} = 74.0$  and 58.6%;  $E_{48} = 74.0$  and 54.0%) emulsifying activity was detected in the bacteria *B. alcalophilus* WS-3027B and *B. funiculus* LY-2403G. Based on the observed abilities of these bacteria to degrade and emulsify oil, as well as their high adaptive properties to low temperature, increased salinity, and alkaline environment, the use of these bacteria is recommended for the bioremediation of contaminated soils under Far North conditions.

**Keywords:** oil, hydrocarbon-oxidizing bacteria, destructive activity, emulsifying activity, *Bacillus*, adaptive properties

**For citation:** Pleshakova E. V., Glinskaya E. V., Korobeynikova A. S., Golubev D. M., Kazakulov E. D., Reshetnikov M. V. Ecological and functional properties of hydrocarbon-oxidizing bacteria isolated from the soils of Kogalym city. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 208–216 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-2-208-216>, EDN: ROQCVP

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## Введение

Нефтяные углеводороды, как известно, оказывают мощное негативное воздействие на почвы нефтегазоносных регионов [1, 2]. Одной из основных территорий в России по добыче нефти является Ханты-Мансийский автономный округ – Югра (ХМАО – Югра), относящийся к районам Крайнего Севера, в котором длительная эксплуатация нефтяных и газовых месторождений существенно повлияла на состояние природной среды [3, 4]. В то же время почвы нефтегазоносного региона можно рассматривать как природный резервуар углеводородокисляющих бактерий, обладающих вследствие постоянного селективного углеводородного прессинга высоким деструктивным потенциалом и адаптированных к природным и климатическим условиям [5].

Когалымское нефтяное месторождение, освоение которого началось в 1985 г., находится в 17 км северо-западнее быстроразвивающегося города Когалыма (ХМАО – Югра). Месторождение относится к Западно-Сибирской провинции – крупнейшему нефтегазоносному бассейну в мире. Основная отрасль промышленности г. Когалыма – нефтедобывающая, а также обработка и транспортировка углеводородной продукции.

В Западной Сибири в зоне умеренного и холодного климата самоочищение почвогрунтов от нефтяного загрязнения с помощью естественной микробиоты затруднено из-за неблагоприятных почвенно-климатических условий: низких среднегодовых температур, слабого влияния абиотических факторов деструкции углеводородов, повышенной концентрации соли, недостатка аэрации и др. В таких условиях наиболее эффективным приемом



очистки является внесение бактерий с необходимыми экологическими характеристиками, способных расти при низкой положительной температуре, приспособленных к повышенной солености почв и обладающих достаточной деструктивной активностью по отношению к загрязнителю. Интродукция таких бактерий позволит продлить период биоремедиации загрязненных почв на несколько месяцев. Поэтому представлялось перспективным использовать почвы нефтегазоносного региона в качестве источника выделения и селекции углеводородокисляющих бактерий, возможных составляющих препаратов для биоремедиации нефтезагрязненных почв в условиях Крайнего Севера. Ранее нами был изучен качественный и количественный состав почвенных микробценозов города Когалыма [6]. Было установлено, что углеводородокисляющие бактерии в почвенных микробценозах г. Когалыма представлены 5 видами, среди которых доминировали виды рода *Bacillus*: *B. alcalophilus*, *B. funiculus*, *B. halodurans*, *B. niacini*, *B. psychrodurans*. Кроме бактерий рода *Bacillus* выявлялись микроорганизмы вида *Curtobacterium flaccumfaciens*, частота встречаемости которых составляла 17%. В сообществах углеводородокисляющих бактерий наблюдалось незначительное преобладание *B. funiculus* (19%) и меньшее содержание *B. alcalophilus* (14%), остальные микроорганизмы были представлены в равных долях (16–17%) Доминирование бактерий рода *Bacillus* в группе углеводородокисляющих микроорганизмов, скорее всего, связано с их способностью к образованию эндоспор и выживанию в период высокой стрессовой нагрузки на окружающую среду. Известно об активном размножении бацилл в почвах и увеличении разнообразия видового состава спорообразующей микробиоты в условиях нефтяного загрязнения и других видов антропогенного воздействия [7, 8], а также о способности бактерий рода *Bacillus* деградировать нефтяные загрязнители. *Curtobacterium flaccumfaciens* описана [9] как бактерия, стимулирующая рост растений. Такие бактерии улучшают рост различных сельскохозяйственных культур и используются в качестве биопрепарата.

Цель настоящей работы состояла в изучении способности бактерий, выделенных из почв г. Когалыма (ХМАО – Югра), к эмульгации и деградации нефтяных углеводородов, оценке адаптационных свойств бактерий.

## Материалы и методы

Объектами исследования служили 6 штаммов углеводородокисляющих бактерий, выделенных ранее из почв г. Когалыма: *Bacillus alcalophilus* WS-3027B, *B. funiculus* LY-2403G, *B. halodurans* MH-3011N, *B. niacini* TC-8101S, *B. psychrodurans* LV-1106E, *Curtobacterium flaccumfaciens* AE-0851V [6]. Бактерии были идентифицированы по совокупности изученных культурально-морфологических, физиолого-биохимических признаков и результатов исследования белковых профилей методом MALDI-ToF масс-спектрометрии на приборе MALDI масс-спектрометре серии microflex (Bruker Daltonics GmbH, Германия). В качестве матрицы использовали  $\alpha$ -циано-4-гидроксикоричную кислоту (Bruker Daltonics GmbH, Германия). При идентификации применяли стандартную библиотеку спектров Biotyper компании Bruker Daltonics GmbH.

Для определения деструктивной активности бактерии культивировали в жидкой минеральной среде М9 с нефтью (1 % по весу) в качестве единственного источника углерода и энергии в течение 14 сут. при комнатной температуре в настольном шейкере-инкубаторе PSU-10i (BioSan, Латвия) при 160 об/мин. В экспериментах использовали нефть, полученную из скважины № 305 Красноярско-Кудединского месторождения. Соотношение нефтяных фракций в данной нефти было следующим, %: парафины и нафтены – 54,2; моно- и бициклические ароматические соединения – 16,7; ПАУ – 6,7; спирто-бензолные смолы – 22,4. Абиотическим контролем служила минеральная среда М9 с углеводородным субстратом без микроорганизмов. В качестве посевного материала использовали смыв суточной культуры бактерий с ГРМ-агара (ФБУН ГНЦ ПМБ, Оболенск, Россия) стерильным физиологическим раствором. Оптическая плотность посевной дозы составляла 1,0 ед. при длине волны 440 нм. Каждый вариант изучали в трех повторностях.

Степень деструкции нефти бактериями оценивали методом адсорбционной хроматографии с последующим гравиметрическим анализом, извлекая сумму неполярных и малополярных углеводородов из культуральной жидкости органическим растворителем (хлороформом) с одновременной очисткой элюата на окиси алюминия в хроматографической колонке. Элюаты собирали в предварительно



взвешенные стеклянные стаканы. После полного испарения растворителя стаканы взвешивали еще раз для определения количества собранных углеводов. По полученным результатам рассчитывали степень деструкции углеводов, которую выражали в процентах [10].

Эмульгирующую активность бактерий по отношению к нефти определяли методом Д. Купера с некоторыми модификациями. Бактерии выращивали в жидкой минеральной среде М9 с добавлением углеводородного субстрата в качестве единственного источника углерода и энергии (20 г/л – глицерина или вазелинового масла) в условиях аэрации при 160 об/мин и комнатной температуре в течение 2 сут. Для оценки экзогенной эмульгирующей активности бактериальные клетки отделяли от культуральной среды с помощью центрифугирования, на центрифуге MiniSpin Plus (Eppendorf, Германия) в течение 10 мин при 8 тыс. об/мин, среду затем дополнительно фильтровали через бумажные фильтры и исследовали супернатант. При измерении эндогенной эмульгирующей активности культуральную среду не центрифугировали. Далее культуральную среду с бактериальными клетками или без них смешивали с нефтью в соотношении 3:2 и интенсивно перемешивали на лабораторном электрическом встряхивателе Вортекс MSV-3500 Heidolf (Германия) при 1000 об/мин в течение 20 мин для получения стабильной эмульсии. После этого пробирки оставляли в вертикальном положении при

комнатной температуре, эмульгирующую активность выражали в процентах, рассчитывая ее как отношение объема эмульсии через 24 ( $E_{24}$ ) и 48 ( $E_{48}$ ) часов к общему объему жидкости, умноженное на 100 %. Каждый образец исследовали в трех повторностях.

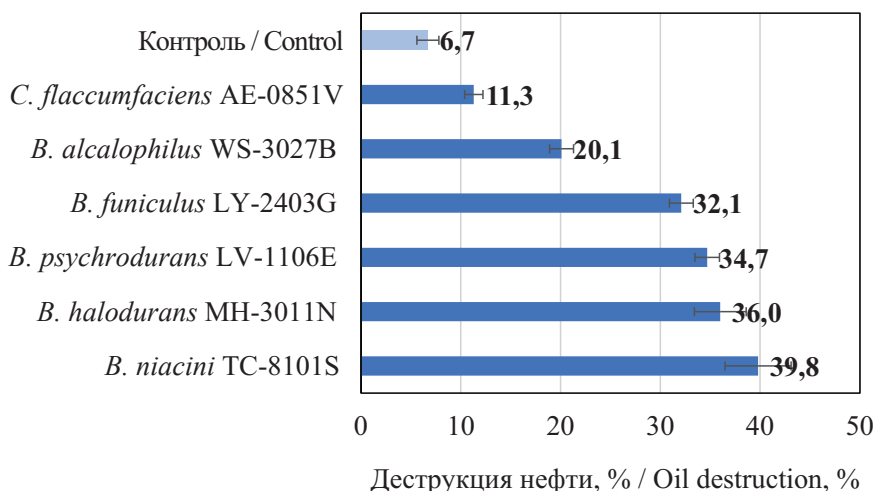
При изучении адаптационных свойств углеводородокисляющих бактерий оценивали их рост на питательной среде в диапазоне pH (2, 3, 4, 5, 9, 10), концентрации NaCl (2, 5, 7, 10, 15 %) и при пониженной температуре (+10 °C).

Полученные результаты были статистически обработаны, а именно определены основные статистические параметры и результаты проверены на нормальность распределения по критерию Колмогорова – Смирнова. Для обработки и анализа данных использовался пакет Statistica 13 и программное обеспечение Microsoft Excel 2007 (for Windows 10). При проверке статистических гипотез критический уровень показателя достоверности  $p$  принимали равным 0,05. Различия считали статистически значимыми при  $p \leq 0,05$ .

### Результаты и их обсуждение

Согласно полученным данным, через 14 сут. культивирования в контроле (без бактерий) количество нефти снизилось на 6,7%, что связано с ее абиотической трансформацией [11].

У всех изученных бактерий обнаруживалась деструктивная активность по отношению к нефти (рисунок). По степени деструк-



Степень деструкции нефти углеводородокисляющими бактериями за 14 суток  
Figure. The degree of destruction of oil by hydrocarbon-oxidizing bacteria in 14 days



ции нефти исследованные бактерии можно ранжировать следующим образом: *B. niacini* TC-8101S – 39,8% деструкции; *B. halodurans* MH-3011N – 36,0; *B. psychrodurans* LV-1106E – 34,7; *B. funiculus* LY-2403G – 32,1; *B. alcalophilus* WS-3027B – 20,1; *C. flaccumfaciens* AE-0851V – 11,3%. Максимальная деструктивная активность по отношению к нефти наблюдалась у бактерий *B. niacini* TC-8101S (39,8%) и *B. halodurans* MH-3011N (36,0%). Способность к деструкции нефтяных углеводородов у четырех изученных штаммов (>30 %) сравнима со способностью у известных бактерий-деструкторов углеводородов [12, 13].

В настоящих исследованиях мы определили деструктивную активность бактерий на основании остаточного содержания в среде культивирования общих нефтяных углеводородов согласно ПНД Ф 16.1:2:2.2:2.3:3.64-10 [10]. Ранее при изучении субстратного спектра было обнаружено, что *B. alcalophilus* WS-3027B, *B. psychrodurans* LV-1106E, *B. halodurans* MH-3011N и *B. funiculus* LY-2403G способны использовать в качестве единственного источника углерода и энергии индивидуальные углеводороды: гексан, гептан, декан, гексадиен и толуол. Бактерия *C. flaccumfaciens* AE-0851V использовала для роста только пре-

дельные углеводороды: гептан и гексан. Полученные результаты соответствуют известным данным о том, что бактерии-нефтедеструкторы легче и быстрее окисляют нормальные и изоалканы [14].

Известно, что нередко углеводородокисляющие бактерии способны к синтезу биосурфактантов, облегчающих поглощение углеводородов бактериями [15]. Бактерии рода *Bacillus* синтезируют биоэмульгаторы липопептидной природы, а именно сурфактин и итурин [16]. Эти биоПАВ эмульгируют нефть в широком диапазоне температур и при разных уровнях кислотности. Среди продуцентов биоПАВ бактерии рода *Bacillus* способны генерировать наиболее низкое межфазное натяжение между углеводородами и жидкой фазой, что нашло широкое применение в микробиологическом методе нефтеотдачи пластов [17].

У всех исследованных нами углеводородокисляющих бактерий рода *Bacillus*, выделенных из почв г. Когалыма, в ходе проведенных исследований была обнаружена экзо- и эндогенная эмульгирующая активность по отношению к нефти, образовавшиеся нефтяные эмульсии обладали достаточной стабильностью (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Эмульгирующая активность углеводородокисляющих бактерий  
Emulsifying activity of hydrocarbon-oxidizing bacteria

Бактерии / Bacterium	Эмульгирующая активность по отношению к нефти, % / Emulsifying activity in relation to oil, %			
	Эндогенная / Endogenous		Экзогенная / Exogenous	
	E <sub>24</sub>	E <sub>48</sub>	E <sub>24</sub>	E <sub>48</sub>
<i>B. halodurans</i> MH-3011N	40,0±0,0	47,3±1,2	44,7±3,0	44,7±3,0
<i>B. alcalophilus</i> WS-3027B	70,0±2,6	68,7±1,1	74,0±2,8	74,0±2,8
<i>B. funiculus</i> LY-2403G	53,0±1,4	62,0±3,4	58,6±3,1	54,0±0,0
<i>B. niacini</i> TC-8101S	43,3±2,3	43,3±2,3	44,0±2,8	44,0±2,0
<i>B. psychrodurans</i> LV-1106E	42,7±1,1	44,0±2,0	43,0±2,8	43,0±1,4

У бактерий *B. alcalophilus* WS-3027B и *B. funiculus* LY-2403G обнаруживалась максимальная активность: через 24 ч эндогенная активность у них составила 70,0 и 53,0%, через 48 ч – 68,7 и 62,0%. Экзогенная эмульгирующая активность у данных бактерий через

24 ч составила 74,0 и 58,6%, через 48 ч – 74,0 и 54,0%. Проявленная этими бактериями высокая экзогенная эмульгирующая активность в отношении нефти свидетельствует о возможном синтезе ими биоПАВ. Эти результаты указывают на возможные преимущества данных



бактерий в процессах утилизации нефтяных углеводородов, так как биоэмульгирующая активность микроорганизмов в сочетании с биодеградирующей способностью сможет обеспечить большую биодоступность углеводородов в различных условиях окружающей среды.

Известны представители рода *Bacillus*, входящие в состав микробных композиций, рекомендованных для ремедиации нефтезагрязненных почв, например, бактерии *Bacillus megaterium* ВКМ В-396 и *Bacillus subtilis* ВКПМ В-5328 в препарате «Биоинит» [18]; *Bacillus vallismoris* ВКПМ В-11017 в консорциуме углеводородокисляющих микроорганизмов [19]. Кроме того, известны индивидуальные штаммы-нефтедеструкторы, относящиеся к роду *Bacillus*: *Bacillus subtilis* Колыма 7/2 [20], *Bacillus subtilis* DM-04 [21] и др. В лабораторных и полевых экспериментах ученые

изучают возможности использования бактерий-нефтедеструкторов для биоремедиации почв, в том числе для очистки северных территорий. При этом результаты исследований показывают, что в северных экосистемах с многолетнемерзлыми породами, небольшой мощностью гумусового горизонта, невысокой биологической активностью почв внесение используемых бактерий не всегда эффективно, требуются бактерии с широким диапазоном адаптивных свойств.

Результаты исследования адаптационных свойств углеводородокисляющих бактерий, выделенных из почв г. Когалыма, показали, что бактерии *B. niacini* TC-8101S и *B. psychrodurans* LV-1106E росли в максимально широком диапазоне pH: от 1 до 10 и при высоких концентрациях NaCl (15%) (табл. 2). Остальные 4 изученных бактериальных штамма росли при значениях pH от 4 до 10.

Таблица 2 / Table 2

**Адаптационные свойства углеводородокисляющих бактерий**  
**Adaptive properties of hydrocarbon- oxidizing bacteria**

Условия роста / Growth conditions		Бактерии / Bacterium					
		<i>B. alcalophilus</i> WS- 3027B	<i>B. funiculus</i> LY- 2403G	<i>B. niacini</i> TC- 8101S	<i>B. psychrodurans</i> LV- 1106E	<i>B. halodurans</i> MH- 3011N	<i>C. flaccumfaciens</i> AE- 0851V
pH	1	-	-	+	+	-	-
	2	-	-	+	+	-	-
	3	-	-	+	+	-	-
	4	+	+	+	+	+	+
	5	+	+	+	+	+	+
	9	+	+	+	+	+	+
	10	+	+	+	+	+	+
NaCl, %	2	-	+	-	+	+	-
	5	+	+	+	+	+	+
	7	+	-	+	+	-	+
	10	-	-	+	+	-	+
	15	-	-	+	+	-	-
Температура, °C Temperature, °C	10	-	+	+	+	-	+



При 7%-ной концентрации NaCl был способен к росту бактериальный штамм *B. alcalophilus* WS-3027B, при 10%-ной – *C. flaccumfaciens* AE-0851V. При пониженной температуре (+10°C) хорошо росли 4 изученных штамма, за исключением *B. alcalophilus* WS-3027B и *B. halodurans* MH-3011N. Двум бактериальным штаммам (*B. niacini* TC-8101S и *B. psychrodurans* LV-1106E) была свойственна кислотолерантность, что согласуется с известными данными о повышенной кислотности почв Западной Сибири.

### Заключение

В ходе проведенных исследований установлено, что все выделенные из почв г. Когалыма бактерии хорошо усваивали нефть в качестве единственного источника углерода и энергии, что может быть связано с источниками их выделения (почвы нефтегазоносного региона) и, как следствие, многолетней адаптацией к данному субстрату как источнику питания.

По мнению исследователей [22], микроорганизмы в составе бактериальных препаратов для биоремедиации нефтезагрязненных почв в условиях Крайнего Севера должны быть адаптированы к низкой температуре, повышенной концентрации соли, низкому содержанию питательных веществ. Как показали результаты наших экспериментов, каждый из изученных микроорганизмов обладал не только эмульгирующей и деструктивной активностью по отношению к нефтяным углеводородам, но и устойчивостью к различным неблагоприятным условиям среды (способностью к росту при пониженной температуре, повышенной минерализации и щелочности). Широкий спектр приспособленности играет важную роль для потенциального использования данных микробных штаммов в качестве основных составляющих препаратов для биоремедиации почв.

Выявленные характеристики углеводородокисляющих бактерий позволяют рассматривать их как потенциальных интродуцентов (как отдельно, так и в ассоциациях) для использования в технологиях очистки нефтезагрязненных объектов окружающей среды в условиях Крайнего Севера.

### Список литературы

1. Геннадиев А. Н. Нефть и окружающая среда // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2016. № 6. С. 30–39.
2. Тихомиров О. А., Тихомирова Е. А. Геоэкологические проблемы разработки месторождений и транспортировки нефти // Вестник ТвГУ. Серия «География и Геоэкология». 2019. № 1 (25). С. 50–61. <https://doi.org/10.26456/2226-7719-2019-1-50-61>
3. Ересько А. А. Экологические проблемы, связанные с добычей нефти и газа в ХМАО // Modern Science. 2019. № 12, ч. 4. С. 24–27.
4. Максименко В. А. Экологические проблемы эксплуатации нефтяных месторождений Ханты-Мансийского автономного округа-Югры // Международный научный журнал «Вестник науки». 2024. Т. 4, № 9 (78). С. 521–525.
5. Егорова Д. О., Бузмаков С. А., Санников П. Ю., Шестаков И. Е., Хотяновская Ю. В. Биоремедиационный потенциал природного микробиоценоза в условиях хронического нефтяного загрязнения // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26, № 10. С. 60–65. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-10-60-65>
6. Pleshakova Ye. V., Glinskaya E. V., Korobeinikova A. S., Sheudzhn A. Sh., Reshetnikov M. V. Ecological and microbiological features of the soils of the city of Kogalym // II International Scientific Forum on Sustainable Development and Innovation (WFSDI 2023). Conference Proceedings. Ekaterinburg : Institute of Digital Economics and Law LLC, 2024. P. 1230–1236.
7. Першина Е. В., Иванова Е. А., Нагиева А. Г. Жиенгалев А. Т., Чирак Е. Л., Андронов Е. Е., Сергалиев Н. Х. Сравнительный анализ микробиомов природных и антропогенно-нарушенных почв северо-западного Казахстана // Почвоведение. 2016. № 6. С. 720–732. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16060095>
8. Фасхутдинова Е. Р., Осинцева М. А., Неверова О. А. Перспективы использования микробиома почв угольных отвалов с целью ремедиации антропогенно нарушенных экосистем // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51, № 4. С. 883–904. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-883-904>
9. Phour M., Sehwat A., Sindhu S.S., Glick B. R. Interkingdom signaling in plant-rhizomicrobiome interactions for sustainable agriculture // Microbiol. Res. 2020. Vol. 241. Art. 126589. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126589>
10. ПНД Ф 16.1:2.2:2.3:3.64-10. Методика измерений массовой доли нефтепродуктов в пробах почв, грунтов, донных отложений, илов, осадков сточных вод, отходов производства и потребления гравиметрическим методом. М. : ФГУ «ФЦАО», 2010. 18 с.
11. Perdigão R., Almeida C. M. R., Santos F., Carvalho M. F., Mucha A. P. Optimization of an autochthonous bacterial consortium obtained from beach sedi-



- ments for bioremediation of petroleum hydrocarbons // Water. 2021. Vol. 13. Art. 66. <https://doi.org/10.3390/w13010066>
12. Хабирова С. Р., Идиятов И. И., Шуралев Э. А., Тремасова А. М., Дорожкин В. И. Скрининг углеводородокисляющих микроорганизмов для биоремедиации почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами // Российский журнал «Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии». 2022. № 1 (41). С. 117–125. <https://doi.org/10.36871/vet.san.hyg.ecol.202201014>
  13. Liu X., Ji J., Zhang X., Chen Z., He L., Wang C. Microbial remediation of crude oil in saline conditions by oil-degrading bacterium *Priestia megaterium* FDU301 // Applied Biochemistry and Biotechnology. 2024. Vol. 196. P. 2694–2712. <https://doi.org/10.1007/s12010-022-04245-4>
  14. Dai X., Lv J., Fu P., Guo S. Microbial remediation of oil-contaminated shorelines: A review // Environmental Science and Pollution Research. 2023. Vol. 30 (41). P. 1–28. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29151-y>
  15. Иваненко И. И., Новикова А. М., Лапатина Е. Я. Исследование микроорганизмов-деструкторов углеводородных загрязнений как способ интенсификации очистки воды // Научно-практический журнал. Водное хозяйство России. 2020. № 6. С. 121–132. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2020-6-7>
  16. Трефилов В. С., Лабанов В. А., Хренова М. Г., Панова Т. В., Родин В. А., Савицкая В. Ю., Кубарева Е. А., Зверева М. Э. Геномная характеристика бактерий *Bacillus subtilis* PY79 и NCIB 3610 как потенциальных продуцентов сурфактина // Биотехнология. 2023. Т. 39, № 5. С. 61–69. <https://doi.org/10.56304/S0234275823050125>
  17. Сарсенова А. С., Гуссейнов И. Ш., Нагметова Г. Ж., Аюпова А. Ж., Аипова Р., Кудайбергенов С. Е., Курманбаев А. А. Изучение влияния штамма *Bacillus subtilis* ж105-11, способного к синтезу БиоПАВ, на вытеснение нефти // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 10, ч. 2. С. 270–273.
  18. Пат. № 2571219 С2 Российская Федерация, МПК C12N 11/14, B09C 1/10, C02F 3/34. Препарат для биодegradации нефтепродуктов «Биоионит» и способ его получения, № 2013128882/10, заявл. 25.06.2013, опубл. 20.12.2015.
  19. Пат. № 2565549 С2 Российская Федерация, МПК B09C 1/10, B01J 20/16, C09K 17/40. Биопрепарат для биоремедиации нефтезагрязненных почв для климатических условий Крайнего Севера, № 2013155969/10, заявл. 17.12.2013, опубл. 20.10.2015.
  20. Пат. № 2446900 С2 Российская Федерация, МПК B09C 1/10. Способ очистки мерзлотных почв от нефти спорообразующими бактериями *Bacillus subtilis*, № 2010129158/13, заявл. 13.07.2010, опубл. 10.04.2012.
  21. Das K., Mukherjee A. K. Crude petroleum-oil biodegradation efficiency of *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa* strains isolated from a petroleum-oil contaminated soil from North-East India // Bioresource Technology. 2007. Vol. 98. P. 1339–1345. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.05.032>
  22. Коршунова Т. Ю., Четвериков С. П., Логинов О. Н. Перспективы использования консорциума углеводородокисляющих микроорганизмов для очистки нефтезагрязнённой почвы Крайнего Севера // Теоретическая и прикладная экология. 2016. № 1. С. 88–94.

## References

1. Gennadiev A. N. Oil and the environment. Moscow University Bulletin. Series 5: Geography, 2016, no. 6, pp. 30–39 (in Russian).
2. Tikhomirov O. A., Tikhomirova E. A. Geoecological problems of oil field development and oil transportation. Bulletin of TvSU. Series “Geography and Geoecology”, 2019, no. 1 (25), pp. 50–61 (in Russian). <https://doi.org/10.26456/2226-7719-2019-1-50-61>
3. Eresko A. A. Environmental problems associated with oil and gas production in the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug. Modern Science, 2019, no. 12, part 4, pp. 24–27 (in Russian).
4. Maksimenko V. A. Environmental problems of oil field exploitation in the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra. International Scientific Journal “Bulletin of Science”, 2024, vol. 4, no. 9 (78), pp. 521–525 (in Russian).
5. Egorova D. O., Buzmakov S. A., Sannikov P. Yu., Shestakov I. E., Khotyanovskaya Yu. V. Bioremediation potential of natural microbiocenosis under chronic oil contamination. Ecology and Industry of Russia, 2022, vol. 26, no. 10, pp. 60–65 (in Russian). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-10-60-65>
6. Pleshakova Ye. V., Glinskaya E. V., Korobeinikova A. S., Sheudzhen A. Sh., Reshetnikov M. V. Ecological and microbiological features of the soils of the city of Kogalym. II International Scientific Forum on Sustainable Development and Innovation (WFSDI 2023). Conference Proceedings. Ekaterinburg, Institute of Digital Economics and Law LLC, 2024, pp. 1230–1236.
7. Pershina E. V., Ivanova E. A., Nagieva A. G., Zhiengaliev A. T., Chirak E. L., Andronov E. E., Sergaliev N. Kh. Comparative analysis of microbiomes of natural and anthropogenically disturbed soils in Northwestern Kazakhstan. Eurasian Soil Science, 2016, no. 6, pp. 720–732 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S1064229316060096>
8. Faskhutdinova E. R., Osintseva M. A., Neverova O. A. Prospects of using coal dump soil microbiome for remediation of anthropogenically disturbed ecosystems. Food Processing: Techniques and Technology, 2021, vol. 51, no. 4, pp. 883–904 (in Russian). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-883-904>
9. Phour M., Sehrawat A., Sindhu S. S., Glick B. R. Interkingdom signaling in plant-rhizomicrobiome interac-



- tions for sustainable agriculture. *Microbiol. Res.*, 2020, vol. 241, art. 126589. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126589>
10. PND F 16.1:2:2.2:3:3.64-10. *Procedure for measuring the mass fraction of petroleum products in samples of soils, grounds, bottom sediments, sludges, wastewater sludges, production and consumption wastes by the gravimetric method*. Moscow, Federal Center for Analysis and Assessment of Technogenic Impact, 2010. 18 p. (in Russian).
  11. Perdigão R., Almeida C. M. R., Santos F., Carvalho M. F., Mucha A. P. Optimization of an autochthonous bacterial consortium obtained from beach sediments for bioremediation of petroleum hydrocarbons. *Water*, 2021, vol. 13, art. 66. <https://doi.org/10.3390/w13010066>
  12. Khabirova S. R., Idiyatov I. I., Shuralev E. A., Tremasova A. M., Dorozhkin V. I. Screening of hydrocarbon-oxidizing microorganisms for bioremediation of soils contaminated with oil and petroleum products. *Russian Journal "Problems of Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology"*, 2022, no. 1 (41), pp. 117–125 (in Russian). <https://doi.org/10.36871/vet.san.hyг.ecol.202201014>
  13. Liu X., Ji J., Zhang X., Chen Z., He L., Wang C. Microbial remediation of crude oil in saline conditions by oil-degrading bacterium *Priestia megaterium* FDU301. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2024, vol. 196, pp. 2694–2712. <https://doi.org/10.1007/s12010-022-04245-4>
  14. Dai X., Lv J., Fu P., Guo S. Microbial remediation of oil-contaminated shorelines: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, vol. 30 (41), pp. 1–28. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29151-y>
  15. Ivanenko I. I., Novikova A. M., Lapatina E. Ya. Study of hydrocarbon-degrading microorganisms as a method for water treatment intensification. *Scientific and Practical Journal "Water Sector of Russia"*, 2020, no. 6, pp. 121–132 (in Russian). <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2020-6-7>
  16. Trefilov V. S., Labanov V. A., Khrenova M. G., Panova T. V., Rodin V. A., Savitskaya V. Yu., Kubareva E. A., Zvereva M. E. Genomic characterization of *Bacillus subtilis* PY79 and NCIB 3610 as potential surfactin producers. *Biotechnology*, 2023, vol. 39, no. 5, pp. 61–69 (in Russian). <https://doi.org/10.56304/S0234275823050125>
  17. Sarsenova A. S., Huseynov I. Sh., Nagmetova G. Zh., Ayupova A. Zh., Aipova R., Kudaibergenov S. E., Kurmanbayev A. A. Study of the effect of *Bacillus subtilis* strain Zh105-11 capable of biosurfactant synthesis on oil displacement. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2017, no. 10, part 2, pp. 270–273.
  18. Pat. No. 2571219 C2 Russian Federation, IPC C12N 11/14, B09C 1/10, C02F 3/34. *Preparation for biodegradation of petroleum products "Bioionite" and method for its production*, no. 2013128882/10, filed 25.06.2013, published 20.12.2015 (in Russian).
  19. Pat. No. 2565549 C2 Russian Federation, IPC B09C 1/10, B01J 20/16, C09K 17/40. *Biological preparation for bioremediation of oil-contaminated soils under climatic conditions of the Far North*, no. 2013155969/10, filed 17.12.2013, published 20.10.2015 (in Russian).
  20. Pat. No. 2446900 C2 Russian Federation, IPC B09C 1/10. *Method for cleaning permafrost soils from oil using spore-forming bacteria *Bacillus subtilis**, no. 2010129158/13, filed 13.07.2010, published 10.04.2012 (in Russian).
  21. Das K., Mukherjee A. K. Crude petroleum-oil biodegradation efficiency of *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa* strains isolated from a petroleum-oil contaminated soil from North-East India. *Bioresource Technology*, 2007, vol. 98, pp. 1339–1345. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.05.032>
  22. Korshunova T. Yu., Chetverikov S. P., Loginov O. N. Prospects for the use of a consortium of hydrocarbon-oxidizing microorganisms for the cleanup of oil-contaminated soil in the Far North. *Theoretical and Applied Ecology*, 2016, no. 1, pp. 88–94 (in Russian).

Поступила в редакцию 15.02.2026; одобрена после рецензирования 20.03.2026; принята к публикации 26.03.2026  
The article was submitted 15.02.2026; approved after reviewing 20.03.2026; accepted for publication 26.03.2026