

## Бактерии родов *Acinetobacter* и *Ochrobactrum* в процессах биоремедиации нефтезагрязнённых объектов (обзор)

© 2021. Т. Ю. Коршунова, д. б. н., в. н. с., Е. В. Кузина, к. б. н., с. н. с.,  
 Д. А. Шарипов, м. н. с., Г. Ф. Рафикова, к. б. н., с. н. с.,  
 Уфимский Институт биологии  
 Уфимского федерального исследовательского центра РАН,  
 450054, Россия, г. Уфа, проспект Октября, д. 69,  
 e-mail: korshunovaty@mail.ru

Загрязнение окружающей среды нефтью и продуктами её переработки приобрело глобальные масштабы. Наиболее перспективным, экономически выгодным и экологически безопасным способом решения этой проблемы является биотехнологический, в основе которого лежит использование микроорганизмов, окисляющих углеводороды. Целью обзора отечественной и зарубежной литературы является анализ роли бактерий родов *Acinetobacter* и *Ochrobactrum* в очистке почв и водных объектов от углеводородного загрязнения. Показана их способность к деструкции нефти, нефтепродуктов и разнообразных по своей структуре углеводородов, включая полициклические ароматические в широком диапазоне температуры, pH и солёности среды. Бактерии данного вида способны продуцировать сурфактанты, которые эмульгируют углеводороды, делая последние доступными для разложения микроорганизмами. Продемонстрировано, что представители родов *Acinetobacter* и *Ochrobactrum* входят в состав многочисленных консорциумов, применяемых для ликвидации последствий контаминации экосистем углеводородами. Приведены примеры биопрепаратов-нефтедеструкторов на основе бактерий указанных родов. Обзор свидетельствует о большом научно-практическом интересе к изучению и применению штаммов *Acinetobacter* spp. и *Ochrobactrum* spp. в экологической биотехнологии.

**Ключевые слова:** *Acinetobacter*, *Ochrobactrum*, нефть, углеводороды, биодеструкция, биосурфактанты, биоремедиация.

## Bacteria of the genera *Acinetobacter* and *Ochrobactrum* in the processes of bioremediation of oil-contaminated objects (review)

© 2021. T. Yu. Korshunova ORCID: 0000-0002-6186-0827, E. V. Kuzina ORCID: 0000-0002-6905-0108,  
 D. A. Sharipov ORCID: 0000-0001-5567-2902, G. F. Rafikova ORCID: 0000-0001-7655-5588,  
 Ufa Institute of Biology of Ufa Federal Research Centre,  
 Russian Academy of Sciences,  
 69, Prospekt Oktyabrya, Ufa, Russia, 450054,  
 e-mail: korshunovaty@mail.ru

Environmental pollution by oil and its products has become global. The most promising, most effective and environmentally friendly way to solve this problem is the biotechnological method. It is based on the use of microorganisms that oxidize hydrocarbons. The purpose of the review of Russian and foreign literature is to analyze the role of bacteria of the genera *Acinetobacter* and *Ochrobactrum* in the purification of soil and water from hydrocarbon pollution. Their ability to degrade oil, oil products and hydrocarbons of various structures, including polycyclic aromatic in a wide range of temperature, pH and salinity of the medium, has been shown. It was noted that they have the ability to synthesize biosurfactants that emulsify hydrocarbons. This makes them available for degradation by microorganisms. It has been demonstrated that representatives of the genera *Acinetobacter* and *Ochrobactrum* are members of numerous consortia that are used to eliminate the consequences of ecosystem contamination with hydrocarbons. Examples of oil-destructing biological preparations based on bacteria of the indicated genera are given. The review indicates a great scientific and practical interest in the study and application of strains of *Acinetobacter* spp. and *Ochrobactrum* spp. in environmental biotechnology.

**Keywords:** *Acinetobacter*, *Ochrobactrum*, oil, hydrocarbons, biodegradation, biosurfactants, bioremediation.

Увеличение добычи и, как следствие, масштабов транспортировки, переработки и потребления нефти и её производных приводит к глобальному загрязнению всех компонентов окружающей среды (ОС). Углеводороды (УВ) отрицательно воздействуют на все звенья биологической цепочки и, в целом, деформируют структуру биоценозов [1–3]. Существующие механические, термические и физико-химические методы удаления этих поллютантов дорогостоящи, часто связаны с образованием токсичных побочных продуктов и не обеспечивают полноты очистки. В настоящее время наиболее перспективным методом для решения данной проблемы, как в экономическом, так и в экологическом плане является биотехнологический, основанный на использовании микроорганизмов (МО), отличающихся повышенной способностью к биодegradации компонентов нефти и нефтепродуктов [3–5]. Установлено большое разнообразие углеводородокисляющих МО, однако наиболее широко они распространены среди бактерий родов *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Bacillus*, *Rhodococcus*, *Ochrobactrum* [6–10].

Цель обзора – анализ практического применения бактерий родов *Acinetobacter* и *Ochrobactrum* для очистки окружающей среды от нефтяного загрязнения.

Представители обоих родов распространены повсеместно. Это свободноживущие, строго аэробные грамотрицательные, неспорообразующие гетеротрофные бактерии. В качестве источника углерода они способны использовать очень широкий круг разнообразных веществ, поэтому участвуют в биодеструкции значительного числа токсикантов, в том числе нефти и нефтепродуктов (включая полициклические ароматические УВ (ПАУ)) [11–15]. Так, штаммы *Acinetobacter haemolyticus* MJ01 и *A. johnsonii* MJ4 разрушают более 90% дизельного топлива с начальной концентрацией 20 г/л после инкубации в течение 7 сут [16], а бактерии *A. beijerinckii* 302-PWB-ОН1 и ZRS разлагают его на 65–74% [17, 18].

Показано, что степень деструкции сырой нефти штаммами *Acinetobacter* sp., *A. calcoaceticus* 134 и АКС в течение 40 сут в лабораторном опыте составляет 40–73%, а в полевых условиях – 40–60% [19]. *Acinetobacter* sp. НС8-3S разрушает фракцию насыщенных УВ сырой нефти на 94% за 5 сут, поэтому он был признан полезным для нужд природоохранной деятельности и параметры его ферментации были оптимизированы для промышленного культивирования [20, 21]. Штамм

*Acinetobacter* sp. N3 при 30 °С, рН 8,0 ед., концентрации сырой нефти 2 г/л и в условиях крайне высокой солёности модельной среды (35%) разлагал 16,2% загрязнителя [22].

Многие представители р. *Acinetobacter* продуцируют поверхностно-активные вещества (ПАВ), которые эмульгируют нефть и УВ, делая их доступными для МО [23–25]. Бактерии *Acinetobacter* sp. D3-2 и *A. baylyi* ZJ2 образуют биосурфактант липопептидной природы. Использование штамма D3-2 для дегградации сырой нефти в жидкой среде при 30 °С в присутствии 3% NaCl привело к разложению 82% углеводородных соединений [26], а штамма ZJ2 – к уменьшению содержания тяжёлых фракций УВ в почве [27]. Штамм *A. haemolyticus* Zn01 синтезирует биоПАВ, с помощью которого степень деструкции дизельного топлива за 14 сут достигала 92% [28].

Четыре изолята *A. radioresistens* и один штамм *A. calcoaceticus* утилизируют сырую нефть, н-гексадекан, флуорен и фенантрен, а также проявляют устойчивость к меди или кадмию, поэтому могут быть использованы для биоремедиации участков, контаминированных одновременно нефтью и тяжёлыми металлами [29].

Штамм *A. baumannii* BT1A за 7 сут разлагает 83% длинноцепочечных н-алканов, содержащихся в сырой нефти [30], а *A. calcoaceticus* CA16 разрушает 82–92% алифатических УВ (C<sub>12</sub>–C<sub>18</sub>) за 28 сут [31]. Степень биодеструкции фракции C<sub>18</sub>–C<sub>22</sub> бактерией *A. halotolerans* R160T составляет 50%, а керосина, дизельного топлива и бензина – 44–46% [32]. Изолят *Acinetobacter* sp. K-6 также способен к дегградации 56,4% н-алканов (C<sub>18</sub>–C<sub>22</sub>) и 59,2% дизельного топлива в загрязнённой почве [33]. Штамм *A. junii* VA2 утилизирует 75,8% дизельного топлива за 15 сут [34].

Как известно [5, 35], использование нефтеокисляющих консорциумов более эффективно по сравнению с отдельными видами МО, так как интродукция монокультуры не может полностью решить проблему очистки от такого сложного многокомпонентного загрязнителя как нефть. Бактериальные ассоциации из штаммов, относящихся к разным таксономическим группам и отличающихся по скорости роста, спектру потребляемых субстратов и особенностям метаболизма, имеют более широкие адаптационные и экологические возможности. Кроме того, между членами консорциума возможны синергетические взаимодействия. Например, один из них может удалять токсичные для других промежуточные продукты окис-

ления УВ или выделять метаболиты, являющиеся факторами роста для иных штаммов. Таким образом, при применении микробных ассоциаций (консорциумов), как природных, так и искусственно разработанных, биodeградация нефти происходит полнее и за меньшие сроки [36–39].

Представители р. *Acinetobacter* входят в состав многочисленных углеводородокисляющих консорциумов. Так, предложена искусственная ассоциация бактерий-нефтедеструкторов родов *Acinetobacter*, *Pseudomonas* и *Bacillus*, при использовании которой за 21 сут культивирования в жидкой среде с нефтью при 10 °С степень биodeградации поллютанта составляла 69–84%. Внесение ассоциации в почву ускорило снижение её токсичности после загрязнения отработанным автомобильным маслом и соляркой, способствовало восстановлению микробиоценоза и травяного покрова [36]. Проведено исследование эффективности применения бактерий *P. aeruginosa*, *B. subtilis* и *A. lwoffii* для разложения сырой нефти по отдельности и в консорциуме. При температуре 22 °С после 28 сут инкубации индивидуальные культуры показали меньший рост и деградацию токсиканта (74,3–77,8%), чем состоящий из них консорциум, с помощью которого утилизировали 88,5% нефти [40].

Из штамма *A. junii* Н11S-25 и представителей родов *Nitratireductor* и *Pseudomonas* создан консорциум, который за 3 сут показал высокую эффективность разложения сырой нефти (45,4%), общих алканов (C<sub>10</sub>–C<sub>34</sub>) (74,2%) и общих ПАУ (65,7%). Степень биodeградации таких ПАУ, как пристан и хризен, составила 84,5 и 80,5% соответственно [41]. Ассоциация, включающая штаммы *A. lwoffii* ВJ10 и *A. pittii* ВJ6 и МО родов *Raoultella*, *Bacillus* и *Serratia*, деградировала более 94% сырой нефти после 10 сут культивирования в жидкой среде и 65% этого токсиканта после 40 сут инкубации в почве [42].

Доказана эффективность консорциума из трёх представителей р. *Acinetobacter* для очистки почвы, загрязнённой отработанным моторным маслом (15–20 г/кг почвы). Его деструкция за 2 месяца составила 48,4%, а падение коэффициента гумификации замедлялось на 20% или полностью прекращалось, что свидетельствует о положительной направленности гумусообразования и повышении плодородия почвы [43].

Создана бактериальная ассоциация «ВиО» для биоремедиации нефтезагрязнённых поч-

венных и водных экосистем, состоящая из штаммов-деструкторов родов *Rhodococcus*, *Pseudomonas* и *Acinetobacter*, содержащих кatabолические плазмиды. Она способна к деградации УВ при их концентрации до 30%, в температурном диапазоне 4–42 °С и в присутствии до 5% соли [44]. Запатентованы микробные ассоциации, в состав которых входят штаммы р. *Acinetobacter*, рекомендуемые для удаления из судовых льяльных вод различных нефтепродуктов [45], а также для очистки и восстановления плодородия почв, контаминированных УВ [46, 47]. Бактерии р. *Acinetobacter*, как в виде монокультуры, так и совместно с МО других родов, являются основой нескольких коммерческих биопрепаратов-нефтедеструкторов, таких как «Олеворин», «Дестройл», «Валентис», «Экойл», «Лессорб-био».

Представители р. *Ochrobactrum* так же как и штаммы *Acinetobacter* spp. активно изучаются с точки зрения использования их для очистки экосистем от нефтяного загрязнения [48, 49]. Обнаружен изолят *O. lupini* MS30, который разрушал 94,6% от общего количества УВ в водной среде и 43,6% – в почве [50]. У штаммов *O. cytisi* RAM03, *O. anthropi* RAM06 и RAM17 эти показатели составляют более 93% в воде и 54% – в почве соответственно [51]. *O. anthropi* НМ-1 способен к деструкции отработанного моторного масла на 51–65% [52]. Бактерия *Ochrobactrum* sp. С1 также деградирует отработанные смазочные материалы: её эффективность после 7 сут инкубации составляет 48,5% для моторного масла и 30,5% – для трансформаторного масла [53]. Штамм *Ochrobactrum* sp. обезвреживает нефтешлам, разлагая около 50% УВ, входящих в его состав, за 7 сут культивирования при 28 °С [54], а *O. anthropi* МРЗ за 7 сут разрушает 53% УВ в нефтесодержащей сточной воде и синтезирует экзополисахарид, обладающий высокой эмульгирующей активностью в отношении дизельного топлива (60%) [55].

Полициклические ароматические углеводороды – разнообразная группа органических веществ, многие из которых являются сильными канцерогенами. Будучи производными бензола, ПАУ термодинамически устойчивы, плохо водорастворимы и сильно гидрофобны, поэтому они в значительных количествах накапливаются в природных объектах, что делает их одними из приоритетных загрязнителей ОС [56, 57]. Имеются многочисленные сведения о способности бактерий р. *Ochrobactrum* к окислению этих соединений

[58, 59]. Например, *Ochrobactrum* sp. ВАР5 разлагает бенз[а]пирен в концентрации 50 мг/л за 30 сут на 20% [56]. Биодеструкция антрацена *O. anthropi* 126 составляла 50% при его начальной концентрации в среде 500 мг/л [60]. Штамм *Ochrobactrum* sp. VA1 разлагал 92% фенантрена с исходной концентрацией 3 мг/л в присутствии 3% NaCl в течение 4 сут [61], а *O. anthropi* ВРyF3 был эффективен при деструкции пирена (на 50,4%) и флуорантена (на 49,9%) при их начальном содержании в среде 50 мг/л после 7 сут инкубации [62]. Бактерия *O. anthropi* ВD-2.5.3 может разрушать более 40% сырой нефти и н-алканов, а также 25% ПАУ, присутствующих в морской воде [63]. За 80 сут при 30 °C и содержании фракции ПАУ в количестве 24,2 мг/кг почвы, штамм *O. intermedium* разлагал 69,9% загрязнителя, а при содержании в 47,5 мг/кг – 80,7%. *Ochrobactrum* sp. был менее активен в этих условиях, разлагая 44,4 и 27,3% общих ПАУ соответственно. Деструкция бензо[б]-флуорантена штаммом *O. intermedium* составила 81,8%, бенз[а]пирена – 87,0%, у *Ochrobactrum* sp. эти показатели были более низкими – 59,1 и 56,5% соответственно [15]. По мнению авторов [64, 65], высокая способность к деградации УВ и ПАУ, в частности, у представителей р. *Ochrobactrum* связана с тем, что они производят биосурфактанты, которые уменьшают поверхностное натяжение и обладают высокой эмульгирующей активностью, ускоряя тем самым процесс разрушения УВ. Так, бактерии *O. intermedium* продуцируют биосурфактант гликолипидной природы, который показал стабильность в широких диапазонах рН (2–12 ед.), температуры (25–120 °C) и солёности. Его использование обеспечивает лучшую растворимость нафталина и фенантрена в водной среде [65].

Существует биопрепарат «Охромин» на основе бактерий р. *Ochrobactrum* для очистки почвы и воды от нефти и нефтепродуктов и утилизации нефтесодержащих отходов, применяемый в широком диапазоне температур и рН. Выявлено, что степень разложения нефтешлама с его помощью за один вегетационный период достигала 80–86% [66].

Также как и *Acinetobacter* spp. бактерии р. *Ochrobactrum* входят в состав различных нефтеокисляющих консорциумов. Например, известен консорциум из шести бактериальных штаммов (в том числе *Ochrobactrum* sp.), который осуществлял деградацию 83,7% парафиновой фракции сырой нефти (C<sub>8</sub>–C<sub>35</sub>) [67]. Применение ассоциации, включающей штамм

*O. intermedium*, привело к тому, что за 225 сут показатель ХПК нефтесодержащих сточных вод уменьшился на 95%, общее содержание УВ снизилось с 320 до 8 мг/л, а сами воды перестали считаться фитотоксичными [68]. Для очистки стоков нефтеперерабатывающих заводов от ПАУ предложен консорциум из галотермофильных бактерий (в том числе из двух штаммов вида *O. halosaudia*), который разлагал как низкомолекулярные ПАУ (нафталин, фенантрен, антрацен и флуорен), так и высокомолекулярные (пирен, бенз[а]пирен и бензо[к]флуорантен). Благодаря его применению разложение фенантрена составило 86 и 58% при содержании в среде 20 и 30% NaCl соответственно [69]. Консорциум из бактерий *Ralstonia pickettii*, *Bacillus* sp., *B. circulans* и *O. anthropic* разлагал нефть на 94,4, 80,3 и 72,0% при её начальном содержании в среде в 5, 10 и 15% соответственно [70]. Почва, загрязнённая смесью дизельного топлива и биодизеля, была дважды обработана ассоциацией, состоящей из бактерий родов *Pseudomonas*, *Achromobacter* и *Ochrobactrum*, что привело к снижению за 32 сут общего содержания УВ на 32,2% [71]. Из штамма *Ochrobactrum* sp. N1 и трёх представителей р. *Brevibacillus* разработан консорциум, при использовании которого степень деструкции сырой нефти при температуре 25 °C в жидкой среде с 3% NaCl достигала 79%. В условиях, моделирующих морскую среду, этот показатель составил 51,1% [72]. Из нефтезагрязнённого песка выделен консорциум МО *Achromobacter* sp. и *Ochrobactrum* sp., продуцирующий биосурфактант и разрушающий УВ [73].

Имеются данные об ассоциациях, в которые одновременно входят представители родов *Acinetobacter* и *Ochrobactrum*. Так, разработан консорциум, состоящий из штаммов видов *A. baumannii*, *O. anthropi*, *P. aeruginosa* и *B. subtilis*, разлагающий УВ фракции C<sub>12</sub>–C<sub>22</sub> [74]. Применение природного консорциума, состоящего из бактерий *A. calcoaceticus* ИБ ДТ-5.1/1 и *O. intermedium* ИБ ДТ-5.3/2, эффективно для очистки почв, грунтов, водной поверхности и производственных сточных вод от углеводородного загрязнения, а также обезвреживания нефтесодержащих отходов [75–79]. На его основе создана серия полифункциональных биопрепаратов под торговой маркой «Ленойл»®, предназначенных для снижения содержания УВ в рекультивируемых объектах, а также ускорения восстановления почвы, благодаря азотфиксирующей активности МО, входящих в их состав и



стимуляции роста и развития растений-фиторемедиантов. Разработана и внедрена технология их производства, а сами биопрепараты успешно используются на территории нашей страны и за рубежом.

### Заключение

Анализ литературных данных свидетельствует о том, что на сегодняшний день во всём мире ведётся активная работа по исследованию способностей бактерий родов *Acinetobacter* и *Ochrobactrum* к окислению УВ и продукции веществ, ускоряющих этот процесс, выделению природных и разработке искусственных нефтеокисляющих консорциумов, содержащих штаммы *Acinetobacter* spp. и *Ochrobactrum* spp., а также по практическому применению биопрепаратов-нефтедеструкторов на их основе для ликвидации последствий нефтяного загрязнения ОС.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России № 075-00326-19-00 по теме № АААА-А18-118022190100-9.*

### References

1. Adams G.O., Fufeyin P.T., Okoro S.E., Ehinomen I. Bioremediation, biostimulation and bioaugmentation: a review // Int. Env. Bioremed. Biodegrad. 2015. V. 3. No. 1. P. 28–39. doi: 10.12691/ijebb-3-1-5
2. Koshlaf E., Shahsavari E., Aburto-Medina A., Taha M., Haleyr N., Makadia T.H., Morrison P.D., Ball A.S. Bioremediation potential of diesel-contaminated Libyan soil // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2016. V. 133. P. 297–305. doi: 10.1016/j.ecoenv.2016.07.027
3. Korshunova T.Yu., Chetverikov S.P., Bakaeva M.D., Kuzina E.V., Rafikova G.F., Chetverikova D.V., Loginov O.N. Microorganisms in the elimination of oil pollution consequences (review) // Appl. Biochem. Microbiol. 2019. V. 55. No. 4. P. 344–354. doi: 10.1134/S0003683819040094
4. Ławniczak Ł., Woźniak-Karczewska M., Loibner A.P., Heipieper H.J., Chrzanowski Ł. Microbial degradation of hydrocarbons-basic principles for bioremediation: a review // Molecules. 2020. V. 25. No. 4. P. 856. doi: 10.3390/molecules25040856
5. Chaudhary D.K., Bajagain R., Jeong S.W., Kim J. Effect of consortium bioaugmentation and biostimulation on remediation efficiency and bacterial diversity of diesel-contaminated aged soil // World J. Microbiol. Biotechnol. 2021. V. 37. No. 3. Article No. 46. doi: 10.1007/s11274-021-02999-3
6. Rudenko E.Yu. Effects of crude oil on the biological activity of chernozem soils // Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2020. V. 10. No. 4. P. 719–727 (in Russian). doi: 10.21285/2227-2925-2020-10-4-719-727
7. Tremblay J., Yergeau E., Fortin N., Cobanli S., Elias M., King T.L., Lee K., Greer C.W. Chemical dispersants enhance the activity of oil-and gas condensate-degrading marine bacteria // ISME J. 2017. V. 11. No. 12. P. 2793–2808. doi: 10.1038/ismej.2017.129
8. Varjani S.J. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons // Bioresour. Technol. 2017. V. 223. P. 277–286. doi: 10.1016/j.biortech.2016.10.037
9. Ossai I.C., Ahmed A., Hassan A., Hamid F.S. Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: a review // Environ. Technol. Innov. 2020. V. 17. Article No. 100526. doi: 10.1016/j.eti.2019.100526
10. Korshunova T.Yu., Bakaeva M.D., Kuzina E.V., Rafikova G.F., Chetverikov S.P., Chetverikova D.V., Loginov O.N. Bacteria of the genus *Pseudomonas* in the sustainable development of agricultural systems and environmental protection (review) // Appl. Biochem. Microbiol. 2021. V. 57. No. 3. P. 281–296. doi: 10.1134/S000368382103008X
11. Jung J., Park W. *Acinetobacter* species as model microorganisms in environmental microbiology: current state and perspectives // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2015. V. 99. P. 2533–2548. doi: 10.1007/s00253-015-6439-y
12. Ghosal D., Ghosh S., Dutta T.K., Ahn Y. Current state of knowledge in microbial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): a review // Front. Microbiol. 2016. V. 7. Article No. e1369. doi: 10.3389/fmicb.2016.01369
13. Kotoky R., Das S., Singha L.P., Pandey P., Singha K.M. Biodegradation of benzo[a]pyrene by biofilm-forming and plant growth promoting *Acinetobacter* sp. strain PDB4 // Environ. Technol. Innovation. 2017. V. 8. No. 11. P. 256–268. doi: 10.1016/j.eti.2017.07.007
14. Tirado-Torres D., Acevedo-Sandoval O., Rodríguez-Pastrana B.R., Gayosso-Canales M. Phylogeny and polycyclic aromatic hydrocarbons degradation potential of bacteria isolated from crude oil-contaminated site // J. Environ. Sci. Health. Part A. Tox. Hazard Subst. Environ. Engin. 2017. V. 52. No. 9. P. 897–904. doi: 10.1080/10934529.2017.1316170
15. Cui J.Q., He Q.S., Liu M.H., Chen H., Sun M.B., Wen J.P. Comparative study on different remediation strategies applied in petroleum-contaminated soils // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2020. V. 2. No. 17 (5). Article No. 1606. doi: 10.3390/ijerph17051606
16. Lee M., Woo S.G., Ten L.N. Characterization of novel diesel-degrading strains *Acinetobacter haemolyticus* MJ01 and *Acinetobacter johnsonii* MJ4 isolated from oil-contaminated soil // World J. Microbiol. Biotechnol. 2012. V. 28. No. 5. P. 2057–2067. doi: 10.1007/s11274-012-1008-3
17. Huang L., Xie J., Lv B., Shi X., Li G., Liang F., Lian J. Optimization of nutrient component for diesel oil degradation by *Acinetobacter beijerinckii* ZRS // Mar. Pollut. Bull. 2013. V. 76. No. 1–2. P. 325–332. doi: 10.1016/j.marpolbul.2013.03.037332

18. Lei H., Jing X., Xiaofeng S., Jingyan L. Research on the isolation, identification and degradation characteristics of a diesel oil degrading strain // *Advanc. Mater. Res.* 2013. V. 641–642. P. 206–210. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.641-642.206
19. Podolskii V.P., Bicova A.A., Shevchenko M.U., Gridneva E.V. The application of *Acinetobacter* strains: *A. calcoaceticus* 134 (B-3780), ACKS-1 (B-2838) and *Acinetobacter* sp. (B-5064) for the biodegradation of crude oil and petroleum products in soil // *Vestnik Voronezhskogo gos. arkhitekturno-stroitel'nogo un-ta. Seriya Fiz.-khim. problemy i vysokie tekhnologii stroitel'nogo materialovedeniya*. 2014. No. 8. P. 173–177 (in Russian).
20. Lin M., Liu Y., Chen W., Wang H., Hu X. Use of bacteria-immobilized cotton fibers to absorb and degrade crude oil // *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 2014. V. 88. P. 8–12. doi: 10.1016/j.ibiod.2013.11.015
21. Liu Y., Hu X., Liu H. Industrial-scale culturing of the crude oil-degrading marine *Acinetobacter* sp. strain HC8-3S // *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 2016. V. 107. P. 56–61. doi: 10.1016/j.ibiod.2015.11.007
22. Fatajeva E., Gailiūtė I., Paliulis D., Grigiškis S. The use of *Acinetobacter* sp. for oil hydrocarbon degradation in saline waters // *Biologija*. 2014. V. 60. No. 3. P. 126–133. doi: 10.6004/biologija.v60i3.2974
23. Cai Q., Zhang B., Chen B., Zhu Z., Lin W., Cao T. Screening of biosurfactant producers from petroleum hydrocarbon contaminated sources in cold marine environments // *Mar. Pollut. Bull.* 2014. V. 86. No. 1–2. P. 402–410. doi: 10.1016/j.marpolbul.2014.06.039
24. Fuentes S., Barra B., Caporaso J.G., Seeger M. From rare to dominant: a fine-tuned soil bacterial bloom during petroleum hydrocarbon bioremediation // *Appl. Environ. Microbiol.* 2016. V. 82. P. 888–896. doi: 10.1128/AEM.02625-15
25. Karlapudi A.P., Venkateswarulu T.C.C., Tammineedi J., Kanumuri L., Ravuru B.K., Dirisala V.R., Kodali V.P. Role of biosurfactants in bioremediation of oil pollution – a review // *Petroleum*. 2018. V. 4. No. 3. P. 241–249. doi: 10.1016/j.petlm.2018.03.007
26. Bao M., Pi Y., Wang L., Sun P., Li Y., Cao L. Lipopeptide biosurfactant production bacteria *Acinetobacter* sp. D3-2 and its biodegradation of crude oil // *Environ. Sci. Process Impacts*. 2014. V. 16. No. 4. P. 897–903. doi: 10.1039/c3em00600j
27. Zou C., Wang M., Xing Y., Lan G., Ge T., Yan X., Gu T. Characterization and optimization of biosurfactants produced by *Acinetobacter baylyi* ZJ2 isolated from crude oil-contaminated soil sample towards microbial enhanced oil recovery applications // *Biochem. Engin. J.* 2014. V. 90. P. 49–58. doi: 10.1016/j.bej.2014.05.007
28. Onur G., Yilmaz F., Içgen B. Diesel oil degradation potential of a bacterium inhabiting petroleum hydrocarbon contaminated surface waters and characterization of its emulsification ability // *J. Surfactants Detergents*. 2015. V. 18. No. 4. P. 707–717. doi: 10.1007/s11743-015-1697-3
29. Méndez V., Fuentes S., Morgante V., Hernández M., González M., Moore E., Seeger M. Novel hydrocarbonoclastic metal-tolerant *Acinetobacter* and *Pseudomonas* strains from Aconcagua river oil-polluted soil // *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 2017. V. 17. No. 4. P. 1074–1087. doi: 10.4067/S0718-95162017000400017
30. Acer Ö., Güven K., Bekler F.M., Gül-Güven R. Isolation and characterization of long-chain alkane-degrading *Acinetobacter* sp. BT1A from oil-contaminated soil in Diyarbakır, in the Southeast of Turkey // *Bioremed. J.* 2016. V. 20. No. 1. P. 80–87. doi: 10.1080/10889868.2015.1096898
31. Ho M.T., Li M.S.M., McDowell T., MacDonald J., Yuan Z.-C. Characterization and genomic analysis of a diesel-degrading bacterium, *Acinetobacter calcoaceticus* CA16, isolated from canadian soil // *BMC Biotechnol.* 2020. V. 20. Article No. 39. doi: 10.1186/s12896-020-00632-z
32. Dahal R.H., Chaudhary D.K., Kim J. *Acinetobacter halotolerans* sp. nov., a novel halotolerant, alkalitolerant, and hydrocarbon degrading bacterium, isolated from soil // *Arch Microbiol.* 2017. V. 199. No. 5. P. 701–710. doi: 10.1007/s00203-017-1349-2
33. Chaudhary D.K., Bajagain R., Jeong S.-W., Kim J. Biodegradation of diesel oil and n-alkanes (C<sub>18</sub>, C<sub>20</sub>, and C<sub>22</sub>) by a novel strain *Acinetobacter* sp. K-6 in unsaturated soil // *Environ. Eng. Res.* 2020. V. 25. No. 3. P. 290–298. doi: 10.4491/eer.2019.119
34. Zhang Q., Wang D., Li M., Xiang W.N., Achal V. Isolation and characterization of diesel degrading bacteria, *Sphingomonas* sp. and *Acinetobacter junii* from petroleum contaminated soil // *Front. Earth Sci.* 2014. V. 8. No. 1. P. 58–63. doi: 10.1007/s11707-013-0415-6
35. Varjani S., Upasani V.N. Influence of abiotic factors, natural attenuation, bioaugmentation and nutrient supplementation on bioremediation of petroleum crude contaminated agricultural soil // *J. Environ. Manage.* 2019. V. 1. No. 245. P. 358–366. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.05.070
36. Il'icheva T.N., Mokeeva A.V., Shestopalov A.M., Emel'janova E.K., Alekseev A.Y., Zabelin V.A. Association of strains of bacteria-oil decomposers, and remediation method of oil-contaminated objects // Patent RU 2509159 C2. Application: 2012116827/10, 24.04.2012. Date of publication: 10.03.2014. Bull. 7 (in Russian).
37. Poi G., Aburto-Medina A., Mok P.C., Ball A.S., Shahsavari E. Large scale bioaugmentation of soil contaminated with petroleum hydrocarbons using a mixed microbial consortium // *Ecol. Engin.* 2017. V. 102. P. 64–71. doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.01.048
38. Zhan Y.B., Zhang Q., Chen K.L., Li F.M., Ma L.A. Isolation and construction of petroleum-degrading flora and their degrading characteristics // *Environ. Poll. Control.* 2017. V. 39. P. 860–864.
39. Delegan Y.A., Vetrova A.A., Titok M.A., Filonov A.E. Design of a consortium of thermotolerant bacteria as the basis for a biopreparation for remediate of oil-con-

taminated soils and waters on hot climate // *Biotechnology*. 2016. No. 1. P. 53–64 (in Russian).

40. Al-Wasify R.S., Hamed S.R. Bacterial biodegradation of crude oil using local isolates // *Int. J. Bacteriol*. 2014. Article No. 863272. doi: 10.1155/2014/863272

41. Ma M., Zheng L., Yin X., Gao W., Han B., Li Q., Zhu A., Chen H., Yang H. Reconstruction and evaluation of oil-degrading consortia isolated from sediments of hydrothermal vents in the South Mid-Atlantic Ridge // *Sci. Rep.* 2021. V. 11. Article No. 1456. doi: 10.1038/s41598-021-80991-5

42. Bidja Abena M.T., Sodbaatar N., Li T., Damdinsuren N., Choidash B., Zhong W. Crude oil biodegradation by newly isolated bacterial strains and their consortium under soil microcosm experiment // *Appl. Biochem. Biotechnol.* 2019. V. 189. No. 4. P. 1223–1244. doi: 10.1007/s12010-019-03058-2

43. Loginova O.O., Dang T.T., Belousova E.V., Shevchenko M.Yu., Grabovich M.Yu. Prospects for the use of strains B-3780, B-2838, B-5064 bacteria of the genus *Acinetobacter* for the degradation of soil oil pollution // *Problemy regionalnoy ekologii*. 2011. No. 4. P. 202–208 (in Russian).

44. Vetrova A.A., Zabelin V.A., Ivanova A.A., Adamenko L.A., Delegan Y.A., Petrikov K.V. Oil biodegradation by consortium of oil degrading microorganisms in laboratory model systems // *South of Russia: ecology, development*. 2018. V. 13. No. 1. P. 184–198 (in Russian). doi: 10.18470/1992-1098-2018-1-184-198

45. Loginov Y.O., Loginov O.N., Chetverikov S.P., Bakaeva M.D., Stolyarova E.A., Davletshin T.K. Association of *Pseudomonas hunanensis* microorganism strains and *Acinetobacter baumannii* for cleaning marine oil-contaminated water from oil products // Patent RU 2674893 C1. Application: 2018112056, 03.04.2018. Date of publication: 13.12.2018. Bull. 35 (in Russian).

46. Tolkachnikov Y.B., Tolkachnikov K.Y., Kosyankov Y.V., Titov V.A., Kuznetsov D.N., Gorbunov A.M. Method for remediation of contaminated land // Patent RU 2688282 C1. Application: 2018127116, 23.07.2018. Date of publication: 21.05.2019. Bull. 15 (in Russian).

47. Tretyakova M.S., Belovezhets L.A., Markova Y.A. Microbial preparation for bioremediation of soil contaminated with oil and oil products // Patent RU 2705290 C1. Application: 2019114526, 13.05.2019. Date of publication: 06.11.2019. Bull. 31 (in Russian).

48. Xu B., Yu L., Ma Y., Huang L., Liu B., Wang T., Fu Y. Properties of *Ochrobactrum* of crude oil degrading bacteria and strain screening // *Xinjiang Petroleum Geology*. 2019. V. 40. No. 2. P. 213–217. doi: 10.7657/XJPG20190215

49. Yani M., Charlena C., Mas'ud Z.A., Anas I., Setiadi Y., Syakti A.D. Isolation, selection and identification of polyaromatic hydrocarbons (PAHs) degrading bacteria from heavy oil waste (HOW)-contaminated soil // *Havaty J. Biosci.* 2020. V. 27. No. 2. P. 142–153. doi: 10.4308/hjb.27.2.142

50. Eraky M., Abou-Shanab R.A.I., Salem A.M., Rahman A., Abdel-Gaffar B. Petroleum hydrocarbon degradation potential of *Ochrobactrum lupini* isolated from BTEX enrichment soil // *Int. J. Environment*. 2015. V. 4. No. 3. P. 204–209.

51. Abou-Shanab R.A., Eraky M., Haddad A.M., Abdel-Gaffar A.B., Salem A.M. Characterization of crude oil degrading bacteria isolated from contaminated soils surrounding gas stations // *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 2016. V. 97. No. 5. P. 684–688. doi: 10.1007/s00128-016-1924-2

52. Ibrahim H.M. Biodegradation of used engine oil by novel strains of *Ochrobactrum anthropi* HM-1 and *Citrobacter freundii* HM-2 isolated from oil-contaminated soil // *3 Biotech*. 2016. V. 6. No. 2. Article No. 226. doi: 10.1007/s13205-016-0540-5

53. Bhattacharya M., Biswas D., Sana S., Datta S. Biodegradation of waste lubricants by a newly isolated *Ochrobactrum* sp. C1 // *3 Biotech*. 2015. V. 5. No. 5. P. 807–817. doi: 10.1007/s13205-015-0282-9

54. Obi L.U., Atagana H.I., Adeleke R.A. Isolation and characterisation of crude oil sludge degrading bacteria // *Springerplus*. 2016. V. 5. No. 1. Article No. 1946. doi: 10.1186/s40064-016-3617-z

55. Ramasamy S., Mathiyalagan P., Chandran P. Characterization and optimization of EPS-producing and diesel oil-degrading *Ochrobactrum anthropi* MP3 isolated from refinery wastewater // *Petrol. Sci.* 2014. V. 11. No. 3. P. 439–445.

56. Nikitha T., Satyaprakash M., Satya Vani S., Sadhana B., Padal S.B. A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: their transport, fate and biodegradation in the environment // *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* 2017. V. 6. No. 4. P. 1627–1639. doi: 10.20546/ijcmas.2017.604.199

57. Varjani S.J., Gnansounou E., Gurunathan B., Pant D., Zakaria Z. Polycyclic aromatic hydrocarbons from petroleum oil industry activities: effect on human health and their biodegradation // *Waste bioremediation. Energy, Environment and Sustainability*. Springer, Singapore. 2018. P. 185–199.

58. Bello-Akinosho M., Makofane R., Adeleke R., Thantsha M., Pillay M., Chirima J.G. Potential of polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading bacterial isolates to contribute to soil fertility // *BioMed. Res. Int.* 2016. Article No. 5798593. doi: 10.1155/2016/5798593

59. Kumari S., Regar R.K., Manickam N. Improved polycyclic aromatic hydrocarbon degradation in a crude oil by individual and a consortium of bacteria // *Biore-sour. Technol.* 2018. V. 254. P. 174–179. doi: 10.1016/j.biortech.2018.01.075

60. Alrumman S.A., Hesham A.E.-L., Alamri S.A. Isolation, fingerprinting and genetic identification of indigenous PAHs degrading bacteria from oil-polluted soils // *J. Environ. Biol.* 2016. V. 37. No. 1. P. 75–81.

61. Arulazhagan P., Vasudevan N. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by a halotolerant

bacterial strain *Ochrobactrum* sp. VA1 // Mar. Poll. Bull. 2011. V. 62. No. 2. P. 388–394. doi: 10.1016/j.marpolbul.2010.09.020

62. Ortega-González D.K., Cristiani-Urbina E., Flores-Ortiz C.M., Cruz-Maya J.A., Cancino-Diaz J.C., Jan-Roblero J. Evaluation of the removal of pyrene and fluoranthene by *Ochrobactrum anthropi*, *Fusarium* sp. and their coculture // Appl. Biochem. Biotechnol. 2014. V. 175. P. 1123–1138. doi: 10.1007/s12010-014-1336-x

63. Doan C.D.P., Sano A., Tamaki H., Pham H.N.D., Duong X.H., Terashima Y. Identification and biodegradation characteristics of oil-degrading bacteria from subtropical Iriomote Island, Japan, and tropical Con Dao Island, Vietnam // Tropics. 2016. V. 25. No. 4. P. 147–159. doi: 10.3759/tropics.MS16-01

64. Bezza F.A., Beukes M., Chirwa E.M.N. Application of biosurfactant produced by *Ochrobactrum intermedium* CN3 for enhancing petroleum sludge bioremediation // Proc. Biochem. 2015. V. 50. No. 11. P. 1911–1922. doi: 10.1016/j.procbio.2015.07.002

65. Ferhat S., Alouaoui R., Badis A., Moulai-Mostefa N. Production and characterization of biosurfactant by free and immobilized cells from *Ochrobactrum intermedium* isolated from the soil of southern Algeria with a view to environmental application // Biotechnol. Biotechnological Equip. 2017. V. 31. No. 4. P. 733–742. doi: 10.1080/13102818.2017.1309992

66. Sokolov L.I. Processing and disposal of oily waste. Moskva: Infra-Engineering, 2017. 160 p. (in Russian).

67. Varjani S.J., Rana D.P., Jain A.K., Vivek S.B., Upasani N. Synergistic *ex situ* biodegradation of crude oil by halotolerant bacterial consortium of indigenous strains isolated from on shore sites of Gujarat, India // Int. Biodeterior. Biodegrad. 2015. V. 103. P. 116–124. doi: 10.1016/j.ibiod.2015.03.030

68. Gargouri B., Karray F., Mhiri N., Aloui F., Sayadi S. Application of a continuously stirred tank bioreactor (CSTR) for bioremediation of hydrocarbon-rich industrial wastewater effluents // J. Hazard. Mater. 2011. V. 189. No. 1–2. P. 427–434. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.02.057

69. Pugazhendi A., Qari H., Al-Badry Basahi J.M., Godon J.J., Dhavamani J. Role of a halothermophilic bacterial consortium for the biodegradation of PAHs and the treatment of petroleum wastewater at extreme conditions // Int. Biodeterior. Biodegrad. 2017. V. 121. P. 44–54. doi: 10.1016/j.ibiod.2017.03.015

70. Rinanti A., Nainggolan L.J. Petroleum residues degradation in laboratory-scale by rhizosphere bacteria isolated from the mangrove ecosystem // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2018. V. 106. Article No. 012100. doi: 10.1088/1755-1315/106/1/012100

71. Colla T.S., Andreatza R., Becker F., de Souza M.M., Tramontini L., Prado G.R., Frazzon A.P., Camargo F.A., Bento F.M. Bioremediation assessment of diesel-biodiesel-contaminated soil using an alternative bioaugmentation strategy // Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 2014. V. 21. No. 4. P. 2592–2602. doi: 10.1007/s11356-013-2139-2

72. Bao M., Wang L., Sun P., Cao L., Zou J., Li Y. Biodegradation of crude oil using an efficient microbial consortium in a simulated marine environment // Mar. Pollut. Bull. 2012. V. 64. No. 6. P. 1177–1185. doi: 10.1016/j.marpolbul.2012.03.020

73. Primeia S., Inoue C., Chien M.-F. Potential of biosurfactants' production on degrading heavy oil by bacterial consortia obtained from tsunami-induced oil-spilled beach areas in Miyagi, Japan // J. Mar. Sci. Eng. 2020. V. 8. Article No. 577. doi: 10.3390/jmse8080577

74. Leal P.L., Pinheiro Dadalto S., Fernandes R. de C.R., Queiroz M.E.L.R., Tótola M.R. Enrichment of population density of a bacterial consortium during bioremediation of a soil under successive contaminations with diesel oil // Acta Sci. Biol. Sci. 2018. V. 40. No. 1. Article No. e36904. doi: 10.4025/actasciobiolsci.v40i1.36904

75. Korshunova T.Y., Loginov O.N. Experience of application of consortium of microorganisms-destroyers for neutralization of oil waste // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2014. No. 3 [Internet resource] <http://www.science-education.ru/117-13407> (Accessed: 20.03.2020).

76. Loginov O.N., Sultanov I.M., Chetverikov S.P., Davletshin T.K., Korshunova T.Yu., Stolyarova E.A., Mukhamatdyarova S.R., Kobzyeva N.V. Consortium of strains of microorganisms *Acinetobacter* sp. and *Ochrobactrum* sp., used for purification of water and soil from oil and oil products // Patent RU 2553540 C2. Application: 2012151289/10, 29.11.2012. Date of publication: 20.06.2015. Bull. 17 (in Russian).

77. Korshunova T.Yu., Chetverikov S.P., Loginov O.N. Prospects of using a consortium of hydrocarbon-oxidizing microorganisms for cleaning oil-polluted soil of the extreme north // Theoretical and Applied Ecology. 2016. No. 1. P. 88–94 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2016-1-095-097

78. Korshunova T.Yu., Chetverikov S.P., Loginov O.N. Method for water surface purification from oil pollution // Patent RU 2627598 C2. Application: 2015157018, 29.11.2012. Date of publication: 09.08.2017. Bull. 22 (in Russian).

79. Korshunova T.Yu., Bakaeva M.D., Loginov O.N. Polyfunctional biopreparations-crude oil destructors: the effect on plants and the content of oil in the soil // Ecology and Industry of Russia. 2018. V. 22. No. 9. P. 18–22 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2018-9-18-22