

УДК 635.914

<https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/08>

Шевцов Д.А., Иванцова Е.А., Новочадов В.В.

ОЦЕНКА ФИТОТОКСИЧНОСТИ СВЕТЛО-КАШТАНОВОЙ ПОЧВЫ ПРИ ЕЁ ЗАГРЯЗНЕНИИ СЫРОЙ НЕФТЬЮ И ИСПОЛЬЗОВАНИИ БИОПРЕПАРАТОВ-НЕФТЕДЕСТРУКТОРОВ

D.A. Shevtsov, E.A. Ivantsova, V.V. Novochadov

ASSESSMENT OF LIGHT CHESTNUT SOIL PHYTOTOXICITY AFTER CRUDE OIL POLLUTION AND THE USE OF BIOLOGICS-PETRODESTRUCTORS

Аннотация. Светло-каштановая почва обладает специфической структурной организацией и химическим составом, позволяющими предполагать особенности её негативного влияния на растения (фитотоксичности) при различных загрязнениях, в частности, сырой нефтью. Рассмотрены и обсуждены результаты модельных экспериментов при искусственном загрязнении образцов светло-каштановой почвы нефтью, а также при использовании для её очистки биопрепаратов на основе ассоциаций углеводородокисляющих бактерий (нефтедеструкторов). Для определения содержания нефти в почве использована инфракрасная спектрометрия, pH почвы – кондуктометрия, для анализа фитотоксичности – тест-система, основанная на проращивании семян *Raphanus sativus* L. Показано, что биопрепараты Multibac Active и DOP-UNI эффективно удаляют из почвы за 15 суток свыше 50% сырой нефти, тем больше, чем выше её исходная концентрация. Этот процесс сопровождается уменьшением pH почвы с 6,12 до 4,55–4,94. Без использования биопрепаратов содержание нефти в почве уменьшается при её высоких концентрациях в почве в среднем 7,5%, при низких – не более чем на 4%. Биопрепараты обладают умеренной, а нефть – значительной фитотоксической активностью. Показано, что при сравнении двух биопрепаратов Multibac Active обладает сравнительно большей фитотоксичностью: он уменьшает лабораторную всхожесть семян на 12%, DOP-UNI – только на 4%. Сырая нефть снижает всхожесть в концентрации 2,0 г/кг на 56%, а в концентрации 4,0 г/кг полностью подавляет прорастание семян *R. sativus*. Использование биопрепаратов с целью очистки почвы от нефти усиливает её фитотоксические свойства. Полученные результаты имеют практическое значение для разработки и оптимизации технологий и стратегий биоремедиации почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами.

Abstract. Light chestnut soil has specific structural organization and chemical composition, suggesting the features of its negative effects on plants (phytotoxicity) in various pollutants, in particular crude oil. The article aimed to consider and discuss results of model experiments with artificial contamination of light chestnut soil with oil and attempts of its purification using modern biological products based on associations of hydrocarbon-oxidizing bacteria (oil degraders). One used infrared spectrometry to determine the content of petroleum products in the soil, and conductometry to measure soil pH. To analyze soil phytotoxicity we used the test system based on germination of *Raphanus sativus* seeds. It has been shown for Multibac Active and DOP-UNI to remove effectively over 50% of crude oil from soil in 15 days, the higher its initial concentration. This process is accompanied by a decrease in the pH of the soil to 4.55–4.94. Spontaneous utilization of oil is 7.5% at high oil concentrations of in the soil, and it is no more than 4% at low concentrations. Biological products have moderate phytotoxicity, and oil has significant one. Comparing two biologics, we show that Multibac Active has a comparatively higher phytotoxicity, it reduces laboratory germination of seeds by 12%, and DOP-UNI reduced laboratory germination by only 4%. Crude oil reduces germination at a concentration of 2.0 g/kg by 56%, and at a concentration of 4.0 g/kg, it completely suppresses germination of *R. sativus* seeds. The use of biological products for the purpose of soil purification from oil pollution enhances its phytotoxic properties. These results and findings are of practical importance for the development and optimization of technologies and strategies for bioremediation of soils

Ключевые слова: почва; фитотоксичность; загрязнение нефтепродуктами; углеводородокисляющие микроорганизмы; биоремедиация; *Raphanus sativus*.

Сведения об авторах: Шевцов Денис Александрович, ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет», г. Волгоград, Россия, den14is88@mail.ru; Иванцова Елена Анатольевна, ORCID: 0000-0003-4265-9703, д-р. с.-х. наук, ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет», г. Волгоград, Россия, ivantsova@volsu.ru; Новочадов Валерий Валерьевич, ORCID: 0000-0001-6317-7418, д-р. мед. наук, ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет», г. Волгоград, Россия, novochadov.valeriy@volsu.ru

contaminated with oil and petroleum products. **Keywords:** soil; phytotoxicity; oil pollution; hydrocarbon-oxidizing microorganisms; bioremediation; *Raphanus sativus*.

About the authors: Denis A. Shevtsov, Volgograd State University (Volgograd, Russian Federation). E-mail: den14is88@mail.ru. Elena A. Ivantsova, ORCID: 0000-0003-4265-9703, Doctor of Agriculture Sciences, Volgograd State University, ivantsova@volsu.ru, Volgograd, Russia; Valery V. Novochadov, ORCID: 0000-0001-6317-7418, Doctor of Medical Sciences, Volgograd State University, Volgograd, Russia, novochadov.valeriy@volsu.ru

Шевцов Д.А., Иванцова Е.А., Новочадов В.В. Оценка фитотоксичности светло-каштановой почвы при её загрязнении сырой нефтью и использовании биопрепаратов-нефтедеструкторов // Вестник Нижневартковского государственного университета. 2025. № 1(69). С. 100-110. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/08>

Shevtsov D.A., Ivantsova E.A., & Novochadov V.V. (2025). Assessment of Light Chestnut Soil Phytotoxicity After Crude Oil Pollution and the Use Of Biologics-Petrodestructors. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 1(69), 100-110. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/08>

Введение

Современный технологический уклад неизбежно приводит к постоянному росту вмешательства человека в природную среду и нарушением экосистем планеты. Закономерным следствием этого является все возрастающая активность в направлении минимизации негативного антропогенного воздействия и восстановления нарушенных структур и связей. В этом формате загрязнения воды и почвы нефтью и нефтепродуктами входят в тройку наиболее актуальных экологических проблем современного мира [3; 17].

Небольшие, но повторяющиеся поступления нефти и нефтепродуктов в почву, связанные с хозяйственной деятельностью человека (промышленные, транспортные, агроиндустриальные), а, тем более, аварийные разливы, крайне негативно влияют на её качество, снижают плодородие, ухудшают состояние растений и биоразнообразие, могут представлять угрозу для здоровья человека. Все эти процессы имеют комплексный характер и требуют, соответственно, разностороннего вмешательства для их устранения [4; 11; 13].

Один из подходов, постепенно занимающий основополагающие позиции при устранении последствий попадания в почву нефти и нефтепродуктов – биоремедиация, которая сочетает в себе методики оптимизации условий для роста и размножения аборигенной микрофлоры и внесения в почву целевых биопрепаратов, содержащих углеводородокисляющие микроорганизмы (УОМ). В настоящее время известны десятки бактерий и грибов с таким эффектом, на их основе созданы сотни коммерческих биопрепаратов [16; 17; 22].

Результатом деятельности УОМ является возвращение углерода и водорода в естественные биогеохимические циклы, восстановление химического состава, микрофлоры почвы и её основополагающих свойств в составе экосистем. Эти способности в значительной степени зависят от исходного состава почвы, а также климатических условий, в которых производится биоремедиация [12, 18].

На практике довольно быстро стало понятно, что монокультура УОМ при поступлении её в почву, по определению, не в состоянии решить комплексную задачу биоремедиации, так что все современные биопрепараты, используемые для этих целей, представляют собой консорциумы нескольких штаммов различных УОМ, каждый из которых выполняет свою задачу по устранению нефтепродуктов из почвы [8, 10].

УОМ в состоянии частично или полностью удалить из почвы все компоненты нефти и нефтепродуктов: легкие алифатические окисляются до углекислого газа и воды, более тяжёлые фракции используются для синтеза собственной биомассы. Лидирующими в составе консорциумов коммерческих биопрепаратов являются бактерии родов *Pseudomonas*, *Acinetobacter* и *Bacillus* [3, 19, 22].

При проведении биоремедиации почвы специалисты отмечают такое явление, как вторичная фитотоксическая активность (ФТА) биопрепаратов. В отношении одно- и двухлетних растений последствия их применения могут выявляться на месте произошедшего загрязнения до десяти и более лет, а у древесно-кустарниковых растений она может стать основой для необратимого повреждения, вторичного поражения фитопатогенами и привести к гибели [15]. В то же время, до полной ясности в этом вопросе еще далеко, и требуется детализировать еще многие вопросы ФТА применяемых биопрепаратов в зависимости от их состава, вида и объема нефтяных загрязнений, а также местных почвенных и климатических особенностей. В рамках настоящей работы мы будем понимать под фитотоксичностью свойство почвы в отношении растений, а под ФТА – свойство различных химических веществ влиять на это свойство при поступлении в почву.

Цель исследования – оценить в эксперименте фитотоксический потенциал светло-каштановой почвы при введении различных концентраций сырой нефти и использовании для её удаления двух биопрепаратов, содержащих ассоциации углеводородоксилирующих микроорганизмов.

Материалы и методы

Объектом для моделирования влияния загрязнений на ФТА были выбраны пять случайных образцов светло-каштановой почвы, взятых сотрудниками ФНЦ агроэкологии РАН в июне 2024 года на территории Кировского селекционно-семеноводческого комплекса г. Волгограда (48.617218 N, 44.374706 E). Переданные для работы образцы были получены в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017 и ГОСТ 11464–2011 [1, 2] и аннотированы с точки зрения химического состава, определенного в соответствии с нормативными документами, используемыми в лаборатории анализа ФНЦ агроэкологии РАН: $pH_{\text{вод}} 6,80 \pm 0,07$; натрий $13,2 \pm 1,5$ мг/кг; калий $17,4 \pm 2,8$ мг/кг; кальций $114,8 \pm 13,2$ мг/кг; магний

18,5±2,1 мг/кг; хлориды 18,1±2,0 мг/кг; фосфаты менее 3,0 мг/кг; сульфаты 27,1±2,8 мг/кг; карбонаты 0,06±0,03 ммоль/100 г; бикарбонаты 0,41±0,05 ммоль/100 г; органическое вещество 1,14±0,16%; азот общий 0,23±0,05%; нитраты 70,5±7,9 мг/кг. Перед началом образцы объединили, тщательно перемешали и поместили в стеклянные сосуды из расчета 100 г сухой почвы на каждую пробу.

При формировании опытных проб в качестве поллютанта применяли сырую нефть Арчединского месторождения, находящегося в Фроловском районе Волгоградской области, исходной плотности 0,852 г/см³ в виде 3%-ной эмульсии, для очистки – два коммерческих биопрепарата: Multibac Active (Ecological Laboratories Inc., США), содержащий сообщество природных штаммов УОМ преимущественно рода *Acinetobacter* [23], и DOP-UNI (ООО «Лаборатория микробных технологий», Россия), представляющий собой консорциум УОМ родов *Candida*, *Dietzia*, *Rhodococcus*, *Pseudomonas* и *Acinetobacter*. Рабочий раствор этого биопрепарата готовили из расчета 40 мг сухого вещества на 1 мл дистиллированной воды [24].

Чтобы обеспечить разностороннее изучение влияния нефти и УОМ на ФТА было сформировано 12 различных серий, что с учетом шести повторностей в каждой составило в совокупности 72 опытных пробы (табл. 1).

Таблица 1

Моделирование и состав проб в экспериментальных сериях

Серия	Добавление в опытную пробу	
	Нефть	Биопрепарат
Контрольная	–	–
Multibac Active	–	1 мл
DOP-UNI	–	1 мл
Нефть 1	100 мг	–
Нефть 1 + Multibac Active	100 мг	1 мл
Нефть 1 + DOP-UNI	100 мг	1 мл
Нефть 2	200 мг	–
Нефть 2 + Multibac Active	200 мг	1 мл
Нефть 2 + DOP-UNI	200 мг	1 мл
Нефть 4	400 мг	–
Нефть 4 + Multibac Active	400 мг	1 мл
Нефть 4 + DOP-UNI	400 мг	1 мл

Перед началом следующего этапа испытаний все пробы инкубировали в течение 15 суток при температуре 24 °С, увлажняя каждые трое суток из расчета 5 мл дистиллированной воды на 1 сосуд.

Содержание в подготовленных пробах почвы нефти и нефтепродуктов определяли методом инфракрасной Фурье-спектроскопии на аппарате ФСМ-1202 (Инфраспек, Россия) согласно ПНД Ф 16.1:2.2.22-98 [6]. Величины менее 1,5 г/кг соответствовали низкому уровню загрязнения, между 1,5 г/кг и 3,0 г/кг – умеренному, свыше 3,0 г/кг – высокому уровню загрязнения почвы нефтью. Результаты представляли в мг/кг сухой почвы.

Водородный показатель (рН) определяли согласно ГОСТ 26423–85 с использованием рН-метра Hanna HI 2211 (США).

ФТА почвы оценивали с помощью универсальной модельной тест-системы, основанной на анализе всхожести редиса посевного (*Raphanus sativus* L.) [7, 9].

Использовали семена *R. sativus* сорта «Ранний красный», которые помещали по 5 шт. в каждый сосуд с пробой почвы (25 шт. в каждой серии). К нормально проросшим относили семена, развившие здоровый корешок не менее длины семени без признаков инфицирования и гниения. Энергией прорастания считали процент семян, проросших на третьи сутки, лабораторной всхожестью – на 10-е сутки. Исследование завершали на 21-е сутки, оценивали высоту сохранившихся проростков в см.

Для статистической обработки и визуализации результатов использовали программу Statistica 12.0 (StatSoft Inc., США). После исключения нормального характера распределения в выборках по критерию Колмогорова рассчитывали медианы, разброс между первым и третьим квартилем (Me, Q1÷Q3) и показатель статистической значимости различий по критерию Манна-Уитни. Различия признавали статистически значимыми при уровне доверительной вероятности $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение

Перед началом основной части экспериментов содержание нефти в опытных пробах без воздействия биопрепаратов оказалось ниже исходного на 4,0–7,5%, что вполне объяснимо окислением углеводородов, происходящим в любой почве. Биопрепарат Multibac Active удалял из почвы от 51,1% до 57,3% сырой нефти, в зависимости от её исходной концентрации, DOP-UNI – от 54,3% до 61,5%. Добавление в почву нефти сопровождалось уменьшением рН, использование биопрепаратов приводило к дополнительному закислению почвы, являющемуся компонентом ФТА и значительно более заметному для Multibac Active (табл. 2).

Таблица 2

Содержание нефтепродуктов и рН почвы в модельных сериях, Me (Q1÷Q3)

Серия	Среднее содержание нефтепродуктов, г/кг	Среднее рН _{вод}
Контрольная	0,08 (0,05÷0,11)	6,12 (5,95÷6,18)
Multibac Active	0,06 (0,04÷0,10)	6,15 (5,98÷6,22)
DOP-UNI	0,06 (0,04÷0,09)	6,21 (6,06÷6,37)
Нефть 1,0 г/кг	0,96 (0,91÷1,00) *	5,80 (5,72÷5,91) *
Нефть 1,0 г/кг + Multibac Active	0,41 (0,37÷0,45) *#	5,17 (5,09÷5,32) *#
Нефть 1,0 г/кг + DOP-UNI	0,37 (0,33÷0,42) *#	5,71 (5,57÷5,90) *
Нефть 2,0 г/кг	1,85 (1,77÷1,97) *	5,72 (5,60÷5,82) *
Нефть 2,0 г/кг + Multibac Active	0,89 (0,78÷0,98) *#	5,04 (4,86÷5,23) *#
Нефть 2,0 г/кг + DOP-UNI	0,80 (0,69÷0,89) *#	5,65 (5,45÷5,74) *
Нефть 4,0 г/кг	3,78 (3,62÷3,91) *	5,11 (4,97÷5,26) *
Нефть 4,0 г/кг + Multibac Active	1,85 (1,66÷2,09) *#	4,55 (4,38÷4,70) *#
Нефть 4,0 г/кг + DOP-UNI	1,73 (1,57÷1,90) *#	4,94 (4,68÷5,13) *

Примечание: здесь и далее знаком * отмечены статистически значимые различия с величинами в контрольной серии, знаком # – различия между сериями без биопрепарата и с использованием биопрепарата.

Тестируемые биопрепараты в умеренной степени снижали энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян *R. sativus*. Нефть оказывала более серьезное воздействие на эти процессы: при концентрациях 2,0 г/кг на третьи сутки проросших семян не обнаруживали, а при концентрации 4,0 г/кг семена вообще не прорастали. Внесение биопрепаратов в нефтезагрязненную почву, в большей степени Multibac Active, дополнительно уменьшало энергию роста и лабораторную всхожесть семян, так что максимальное торможение всхожести, как результат суммарной ФТА сырой нефти и биопрепарата, составило для Multibac Active 80%, для DOP-UNI – 72%.

Как биопрепараты, так и, в большей степени, сырая нефть вызывали уменьшение высоты растений на 21-е сутки эксперимента. Уменьшение этой величины от воздействия Multibac Active составило 16,7%, от DOP-UNI – 7,7%. Присутствие нефти в концентрации 1 г/кг приводило к снижению высоты проростков *R. sativus* в 1,43 раза, в концентрации 2 г/кг – в 1,53 раза, при концентрации 4 г/кг проростков получено не было. Использование биопрепаратов для очистки почвы в еще большей степени снижали величину этого показателя (табл. 3).

Проведенные исследования подтвердили эффективность выбранных коммерческих биопрепаратов в отношении очистки почвы от сырой нефти, которая, безусловно является только частью комплекса биоремедиации после произошедшего загрязнения [5, 20].

Тем не менее, была выявлена их собственная ФТА, которая наслаивалась на еще более выраженную ФТА сырой нефти в процессе ее деструкции. При сравнении двух биопрепаратов ФТА DOP-UNI оказывалась явно меньше, чем Multibac Active.

Таблица 3

Всхожесть семян и средняя высота растений в модельных сериях, Ме (Q1 ÷ Q3)

Серия	Средняя энергия роста, %	Средняя лабораторная всхожесть, %	Средняя высота растений, см
Контрольная	44	84	4,68 (4,19÷5,03)
Multibac Active	36	72	3,90 (3,57÷4,15) *
DOP-UNI	40	80	4,32 (4,04÷4,55)
Нефть 1,0 г/кг	24	60	3,28 (3,02÷3,63) *
Нефть 1,0 г/кг + Multibac Active	16	48	2,71 (2,44÷3,10) *
Нефть 1,0 г/кг + DOP-UNI	20	56	3,42 (3,09÷3,98) *
Нефть 2,0 г/кг	0	28	3,05 (2,69÷3,38) *
Нефть 2,0 г/кг + Multibac Active	0	16	2,89 (2,57÷3,08) *
Нефть 2,0 г/кг + DOP-UNI	0	24	3,15 (2,80÷3,42) *
Нефть 4,0 г/кг	0	0	–
Нефть 4,0 г/кг + Multibac Active	0	4	–
Нефть 4,0 г/кг + DOP-UNI	0	12	2,51 (2,30÷2,68) *

Примечание: прочерки в таблице означают отсутствие растений для анализа

Новые подходы в обеспечении полноты биоремедиации почв, в особенности бедных и при массивных загрязнениях, видятся в возвращении к старому правилу: необходимо активировать собственные резервы почвы, вводить в неё не только ассоциации бактерий-

нефтедеструкторов, но и питательную массу для стимуляции аборигенной и адаптации внесённой микрофлоры в составе комплексной почвенной микробиоты [10, 14, 21].

Во всех случаях феномен ФТА почвы и закономерности её динамики под действием биопрепаратов, а также в зависимости от состава почвы и климатических условий необходимо учитывать в процессе планирования комплекса биоремедиации.

Заключение

Биопрепараты Multibac Active и DOP-UNI в модельных экспериментах эффективно удаляют из светло-каштановой почвы за 15 суток свыше 50% сырой нефти, этот процесс сопровождается уменьшением pH среды. Уменьшение содержания нефти в почве в отсутствие применения биопрепаратов составляет не более 7,5%, и тем меньше, чем меньше концентрация нефти в почве. Биопрепараты обладают умеренной, а нефть – значительной ФТА. Multibac Active уменьшает лабораторную всхожесть семян на 12%, DOP-UNI – на 4%, сырая нефть в концентрации 2,0 г/кг – на 56%, а в концентрации 4,0 г/кг – полностью подавляет прорастание семян *Raphanus sativus*. Использование биопрепаратов, уменьшая концентрации нефти в почве, одновременно усиливает её фитотоксические свойства. Полученные результаты имеют практическое значение для разработки и оптимизации технологий и стратегий биоремедиации почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами.

Литература

1. ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы (ССОП). Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. М.: Стандартинформ, 2018. 9 с.
2. ГОСТ Р ИСО 11464–2011. Качество почвы. Предварительная подготовка проб для физико-химического анализа. М.: Стандартинформ, 2012. 11 с.
3. Коршунова Т.Ю., Кузина Е.В., Рафикова Г.Ф., Логинов О.Н. Бактерии рода *Pseudomonas* для очистки окружающей среды от нефтяного загрязнения // Экобиотех. 2020. Т. 3, №1. С. 18–32. <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2020-3-1-18-32>
4. Михедова Е.Е., Абашина Т.Н. Применение биопрепаратов в задачах рекультивации нефтезагрязнений почвенного покрова // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2020. №4(295). С. 10–14. [https://doi.org/10.33285/2411-7013-2020-4\(295\)-10-14](https://doi.org/10.33285/2411-7013-2020-4(295)-10-14)
5. Околелова А.А., Капля В.Н., Лапченков А.Г. Оценка содержания нефтепродуктов в почвах // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2019. Т. 43, №1. С. 76–86. <https://doi.org/10.18413/2075-4671-2019-43-1-76-86>
6. ПНД Ф 16.1:2.2.22-98. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органоминеральных, органических почвах и донных отложениях методом ИК-спектроскопии. М.: ФГБУ «ФЦАО», 2005. 21 с.
7. Свистова И.Д. Методические подходы к определению фитотоксической активности почвы и почвенных микроорганизмов // Лесотехнический журнал. 2019. №2(34). С. 40–46. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/5>
8. Созина И.Д., Данилов А.С. Микробиологическая ремедиация нефтезагрязненных почв // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 297–312. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.8>

9. Тишин А.С. Фитотестирование почв, загрязненных нефтепродуктами // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. №12–2(102). С. 78–83. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.102.12.048>.
10. Ali N., Khanafer M., Al-Awadhi H. Indigenous oil-degrading bacteria more efficient in soil bioremediation than microbial consortium and active even in super oil-saturated soils // *Front Microbiol.* 2022. Vol. 13. e950051. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.950051>.
11. da Silva Correa H., Blum C.T., Galvão F., Maranhão L.T. Effects of oil contamination on plant growth and development: a review // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2022. Vol. 29, No 29. P. 43501–43515. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19939-9>.
12. Funtikova T.V., Akhmetov L.I., Puntus I.F., Mikhailov P.A., Appazov N.O., Narmanova R.A., Filonov A.E., Solyanikova I.P. Bioremediation of oil-contaminated soil of the Republic of Kazakhstan using a new biopreparation // *Microorganisms.* 2023. Vol. 11, No 2. e522. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020522>.
13. Hunt L.J., Duca D., Dan T., Knopper L.D. Petroleum hydrocarbon (PHC) uptake in plants: A literature review // *Environ. Pollut.* 2019. Vol. 245. P. 472–484. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.012>.
14. Igun O.T., Russell P.M., Davenport J., Werner D. Impacts of activated carbon amendments, added from the start or after five months, on the microbiology and outcomes of crude oil bioremediation in soil // *Int. Biodeter. Biodegr.* 2019. Vol. 142. P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.04.008>.
15. Kulikova P.A., Mazlova E.A., Terekhova V.A., Agadzhanian M.V., Uchanov P.V. Evaluation of the acute and chronic toxicity of reagents for the treatment of oil-contaminated soils and sludge // *Chem. Sustain. Dev.* 2019. Vol. 27. P. 336–342. <https://doi.org/10.15372/CSD2019148>.
16. Kuzina E., Rafikova G., Vysotskaya L., Arkhipova T., Bakaeva M., Chetverikova D., Kudoyarova G., Korshunova T., Chetverikov S. Influence of hydrocarbon-oxidizing bacteria on the growth, biochemical characteristics, and hormonal status of barley plants and the content of petroleum hydrocarbons in the soil // *Plants (Basel).* 2021. Vol. 10, No 8. e1745. <https://doi.org/10.3390/plants10081745>.
17. 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. Vol. 25, No 4. e856. <https://doi.org/10.3390/molecules25040856>.
18. Myazin V.A., Korneykova M.V., Chaporgina A.A., Fokina N.V., Vasilyeva G.K. The effectiveness of biostimulation, bioaugmentation and sorption-biological treatment of soil contaminated with petroleum products in the Russian Subarctic // *Microorganisms.* 2021. Vol. 9, No 8. e1722. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9081722>.
19. Ravi A., Ravuri M., Krishnan R., Narenkumar J., Anu K., Alsalhi M.S., Devanesan S., Kamala-Kannan S., Rajasekar A. Characterization of petroleum degrading bacteria and its optimization conditions on effective utilization of petroleum hydrocarbons // *Microbiol. Res.* 2022. Vol. 265. e127184. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127184>.
20. Sui X., Wang X., Li Y., Ji H. Remediation of petroleum-contaminated soils with microbial and microbial combined methods: Advances, mechanisms, and challenges // *Sustainability.* 2021. Vol. 13, No 16. e9267. <https://doi.org/10.3390/su13169267>.

21. Xia M., Fu D., Chakraborty R., Singh R.P., Terry N. Enhanced crude oil depletion by constructed bacterial consortium comprising bioemulsifier producer and petroleum hydrocarbon degraders // *Bioresour. Technol.* 2019. Vol. 282. P. 456–463. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.131>.
22. Xu X., Liu W., Tian S., Wang W., Qi Q., Jiang P., Gao X., Li F., Li H., Yu H. Petroleum hydrocarbon-degrading bacteria for the remediation of oil pollution under aerobic conditions: A perspective analysis // *Front. Microbiol.* 2018. Vol. 9. e2885. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02885>.
23. Универсальный биопрепарат «DOP-UNI» // Лаборатория микробных технологий https://dop-uni.ru/destructor_of_oil_pollution (дата обращения: 15.02.2024).
24. Биопрепарат Multibac Active // Терра Экология. URL: <https://clck.ru/3HPag4> (дата обращения: 15.02.2024).

References

1. GOST 17.4.4.02-2017 (2018). Okhrana prrody (SSOP). Pochvy. Metody otborra i podgotovki prob dlya khimicheskogo, bakteriologicheskogo I gel'mintologicheskogo analiza [Nature protection. Soils. Methods for sampling and preparation of soil for chemical, bacteriological, helminthological analysis]. Moscow: Standartinform, 9 p.
2. GOST R ISO 11464–2011 (2012). Kachestvo pochvy. Predvaritel'naya podgotovka prob dlya fiziko-khimicheskogo analiza [Soil quality. Pretreatment of samples for physico-chemical analysis]. Moscow: Standartinform, 11 p.
3. Korshunova, T.Yu., Kuzina, E.V., Rafikova, G.F., & Loginov, O.N. (2020). Bakterii roda *Pseudomonas* dlya ochistki okruzhayushej sredy ot neftyanogo zagryazneniya [Bacteria of the genus *Pseudomonas* for environmental purification from oil pollution]. *Ekobiotekh*, 3(1), 18–32. <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2020-3-1-18-32> (in Russ.).
4. Mikhedova, E.E., & Abashina, T.N. (2020). Primenenie biopreparatov v zadachakh rekul'tivatsii neftezagryaznenij pochvennogo pokrova [Application of biopreparations to solve the problems of oil pollution remediation of soil cover]. *Zaschita okruzhayushej sredy v neftegazovom komplekse*, 4(295), 11–14. [https://doi.org/10.33285/2411-7013-2020-4\(295\)-10-14](https://doi.org/10.33285/2411-7013-2020-4(295)-10-14) (in Russ.).
5. Okolelova, A.A., Kaplya, V.N., & Lapchenkov, A.G. (2019). Otsenka soderzhaniya nefteproduktov v pochvakh [Evaluation of oil content in soils]. *Nauchye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki*, 43(1), 76–86. <https://doi.org/10.18413/2075-4671-2019-43-1-76-86> (in Russ.).
6. Metodika vyponeniya izmerenij massovoj doli nefteproduktov v mineral'nykh, organogennykh, organo-mineral'nykh pochvakh i donnykh otlozheniyakh metodom IK-spektrometrii [The method of measuring the mass fraction of petroleum products in mineral, organogenic, organo-mineral soils and bottom sediments by IR spectrometry]. MON F 16.1:2.2.22-98. Moscow, FCAO, 2005. 21 p. (in Russ.).
7. Svistova I.D. (2019). Metodicheskie podkhody k opredeleniyu fitotoksicheskoy aktivnosti pochvy i pochvennykh mikroorganizmov [Methodological approaches to the determination of phytotoxic activity of soil and soil microorganisms]. *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 9 (2), 40–46. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/5> (in Russ.).
8. Sozina, I.D., & Danilov, A.S. (2023). Mikrobiologicheskaya remediatsiya neftezagryaznennykh pochv [Microbiological remediation of oil-contaminated soils]. *Zapiski Gornogo instituta*, 260, 297–312. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.8> (in Russ.).

9. Tishin, A.S. (2020). Fitotestirovanie pochv, zagryaznennykh nefteproduktami [Phytotesting of soils contaminated with petroleum products]. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*, (12–2), 78–83. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.102.12.048> (in Russ.).
10. Ali, N., Khanafer, M., & Al-Awadhi, H. (2022). Indigenous oil-degrading bacteria more efficient in soil bioremediation than microbial consortium and active even in super oil-saturated soils. *Frontiers in Microbiology*, 13, 950051. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.950051>.
11. da Silva Correa, H., Blum, C.T., Galvão, F., & Maranhão, L.T. (2022). Effects of oil contamination on plant growth and development: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(29), 43501–43515. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19939-9>.
12. Funtikova, T.V., Akhmetov, L.I., Puntus, I.F., Mikhailov, P.A., Appazov, N.O., Narmanova, R.A., Filonov, A.E., & Solyanikova, I.P. (2023). Bioremediation of oil-contaminated soil of the Republic of Kazakhstan using a new biopreparation. *Microorganisms*, 11(2):522. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020522>.
13. Hunt, L.J., Duca, D., Dan, T., & Knopper L.D. (2019). Petroleum hydrocarbon (PHC) uptake in plants: A literature review. *Environmental Pollution*, 245, 472–484. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.012>.
14. Igun, O.T., Russell, P.M., Davenport, J., & Werner, D. (2019). Impacts of activated carbon amendments, added from the start or after five months, on the microbiology and outcomes of crude oil bioremediation in soil. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 142, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.04.008>.
15. Kulikova, P.A., Mazlova, E.A., Terekhova, V.A., Agadzhanian, M.V., & Uchanov, P.V. (2019). Evaluation of the acute and chronic toxicity of reagents for the treatment of oil-contaminated soils and sludge. *Chemistry for Sustainable Development*, 27, 336–342. <https://doi.org/10.15372/CSD2019148>.
16. Kuzina, E., Rafikova, G., Vysotskaya, L., Arkhipova, T., Bakaeva, M., Chetverikova, D., Kudoyarova, G., Korshunova, T., & Chetverikov, S. (2021). Influence of hydrocarbon-oxidizing bacteria on the growth, biochemical characteristics, and hormonal status of barley plants and the content of petroleum hydrocarbons in the soil. *Plants (Basel)*, 10(8), 1745. <https://doi.org/10.3390/plants10081745>.
17. Ławniczak, Ł., Woźniak-Karczewska, M., Loibner, A.P., Heipieper, H.J., & Chrzanowski, Ł. (2020). Microbial degradation of hydrocarbons-basic principles for bioremediation: a review. *Molecules*, 25(4), e856. <https://doi.org/10.3390/molecules25040856>.
18. Myazin, V.A., Korneykova, M.V., Chaporgina, A.A., Fokina, N.V., & Vasilyeva, G.K. (2021). The effectiveness of biostimulation, bioaugmentation and sorption-biological treatment of soil contaminated with petroleum products in the Russian Subarctic. *Microorganisms*, 9(8), 1722. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9081722>.
19. Ravi, A., Ravuri, M., Krishnan, R., Narenkumar, J., Anu, K., Alsalhi, M.S., Devanesan, S., Kamala-Kannan, S., & Rajasekar, A. (2022). Characterization of petroleum degrading bacteria and its optimization conditions on effective utilization of petroleum hydrocarbons. *Microbiological research*, 265, 127184. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127184>.
20. Sui, X., Wang, X., Li, Y., & Ji, H. (2021). Remediation of petroleum-contaminated soils with microbial and microbial combined methods: Advances, mechanisms, and challenges. *Sustainability*, 13(16), 9267. <https://doi.org/10.3390/su13169267>.

21. Xia, M., Fu, D., Chakraborty, R., Singh, R.P., & Terry N. (2019). Enhanced crude oil depletion by constructed bacterial consortium comprising bioemulsifier producer and petroleum hydrocarbon degraders. *Bioresource Technology*, 282, 456–463. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.131>.
22. Xu, X., Liu, W., Tian, S., Wang, W., Qi, Q., Jiang, P., Gao, X., Li, F., Li, H., & Yu, H. (2018). Petroleum hydrocarbon-degrading bacteria for the remediation of oil pollution under aerobic conditions: A perspective analysis. *Frontiers in Microbiology*, 9, 2885. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02885>.
23. Universal biopreparation DOP-UNI. Laboratory of microbial technologies. https://dop-uni.ru/destructor_of_oil_pollution (access date Feb 02, 2024).
24. Biopreparation Multibac Active. Terra Ecology. URL: <https://clck.ru/3HPag4> (access date Feb 02, 2024).

дата поступления: 24.12.2024

дата принятия: 06.02.2025

© Шевцов Д.А., Иванцова Е.А., Новочадов В.В., 2025