

Оригинальная статья

УДК 573.6:631.432.23:631.432.31:502.37:504.53.062.4

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2025-1-64-79>

ИЗМЕНЕНИЕ КАПИЛЛЯРНОЙ ВЛАГОЕМКОСТИ И ФИТОТОКСИЧНОСТИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕФТЕРАЗРУШАЮЩЕГО БИОПРЕПАРАТА «DOP-UNI» В КРАТКОСРОЧНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

М. Б. Рюмин ¹, Д. И. Стом ^{1-4✉}, А. Э. Балаян ¹, О. Г. Лопатовская ¹,
Г. О. Жданова ^{2,4}, А. Б. Купчинский ², Ю. Ю. Петрова ⁴, М. Н. Саксонов ¹

¹ Иркутский государственный университет

Россия, 664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, д. 1

² Байкальский музей СО РАН

Россия, 664520, Иркутская обл., пос. Листвянка, ул. Академическая, д. 1

³ Иркутский национальный исследовательский технический университет

Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83

⁴ Сургутский государственный университет,

Россия, 628412, г. Сургут, ул. Энергетиков, д. 22

Поступила в редакцию 13.09.2023 г., после доработки 11.05.2024 г., принята 15.05.2024 г., опубликована 31.03.2025 г.

Аннотация. Показано, что загрязнение серых лесных почв нефтью и дизельным топливом в концентрациях 50, 150 и 300 мл/кг приводило к снижению их капиллярной влагоемкости. При внесении 50 мл/кг нефти этот показатель снижался с 62 (соответствует наилучшей капиллярной влагоемкости) до 22.6%, при 150 мл/кг – до 19.1%, при 300 мл/кг – до 12.6%. Действие дизельного топлива на капиллярную влагоемкость почвы было аналогичным. В присутствии 50, 150 и 300 мл/кг этого нефтепродукта капиллярная влагоемкость почвы с 62% снижалась до 28.3, 20.0 и 13.8% соответственно. В результате внесения микробного нефтеразрушающего препарата «DOP-UNI» и последующей экспозиции в течение 3 недель удавалось частично восстановить эту агрофизическую характеристику почвы. Даже за такое короткое время экспозиции капиллярная влагоемкость почвы, загрязненной нефтью (50 – 300 мл/кг), после обработки биопрепаратом повышалась в 1.3 – 1.8 раза по сравнению с необработанным нефтезагрязненным образцом. Однако ее значения все же оставались ниже, чем в незагрязненных образцах почвы. Подобная тенденция отмечена в эксперименте с дизельным топливом. Кроме того, обработка нефтезагрязненной почвы биопрепаратом DOP-UNI уже в течение 3 недель приводила к снижению (примерно на 20%) фитотоксичности при уровне нефтезагрязнения до 150 г/кг. Полученные материалы позволяют судить о

✉ Для корреспонденции. Лаборатория водной токсикологии научно-исследовательского института биологии Иркутского государственного университета.

ORCID и e-mail адреса: Рюмин Максим Борисович: <https://orcid.org/0009-0006-4762-4613>, maksim.ryumin@mail.ru; Стом Дэвард Иосифович: <https://orcid.org/0000-0001-9496-2961>, stomd@mail.ru; Балаян Алла Эдуардовна: <https://orcid.org/0009-0001-3934-9598>, 7balla@mail.ru; Лопатовская Ольга Геннадьевна: <https://orcid.org/0000-0002-5570-545X>, lopatovs@gmail.com; Жданова Галина Олеговна: <https://orcid.org/0000-0002-8355-9517>, zhdanova86@ya.ru; Купчинский Александр Борисович: <https://orcid.org/0000-0001-8884-8636>, albor67@mail.ru; Петрова Юлия Юрьевна: <https://orcid.org/0000-0003-3702-2249>, petrova_juju@surgu.ru; Саксонов Михаил Наумович: <https://orcid.org/0000-0003-0094-2447>, msaksonov@mail.ru.

© Рюмин М. Б., Стом Д. И., Балаян А. Э., Лопатовская О. Г., Жданова Г. О., Купчинский А. Б., Петрова Ю. Ю., Саксонов М. Н., 2025

ИЗМЕНЕНИЕ КАПИЛЛЯРНОЙ ВЛАГОЕМКОСТИ

перспективах использования биопрепарата DOP-UNI для ремедиации почв при загрязнении нефтепродуктами и восстановления их агрофизических свойств. При этом понижение температуры до 10°C не оказывало значительного влияния на эффективность работы биопрепарата, по крайней мере в описанных 3-недельных экспериментах. Это свидетельствует о возможности его применения в условиях пониженных температур, что характерно для основных мест нефтедобычи РФ.

Ключевые слова: нефтезагрязнение почв, нефтеокисляющие микроорганизмы, биопрепарат DOP-UNI, капиллярная влагоемкость почв, фитотоксичность

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (проект № 2023-227-05 «Разработка эффективных методов ускорения деструкции нефтепродуктов в почвенно-климатических условиях Ханты-Мансийского автономного округа – Югра»).

Соблюдение этических норм. В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Рюмин М. Б., Стом Д. И., Балаян А. Э., Лопатовская О. Г., Жданова Г. О., Купчинский А. Б., Петрова Ю. Ю., Саксонов М. Н. Изменение капиллярной влагоемкости и фитотоксичности нефтезагрязненных почв под действием нефтеразрушающего биопрепарата «DOP-UNI» в краткосрочном эксперименте // Поволжский экологический журнал. 2025. № 1. С. 64 – 79. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2025-1-64-79>

ВВЕДЕНИЕ

Освоение, обустройство и эксплуатация месторождений нефти нередко сопровождаются загрязнением земель углеводородами (Замотаев и др., 2015; Chachina et al., 2023). При попадании нефти в почву нарушается стабильное функционирование экосистем. В результате этого изменяются физические и химические свойства почвы. Нарушается почвенная структура, блокируется активность почвенных ферментов, участвующих в важных биологических процессах. Как следствие, происходит снижение почвенного плодородия (Prabhu et al., 2017; Abdallah et al., 2023).

В России и за рубежом используются разнообразные методы очистки почвы от нефтяного загрязнения (Топчий и др., 2022; Успанова и др., 2022; Щемелинина, Анчугова, 2023; Tang, Juan, 2019; Park, 2021; Nikolaev et al., 2021; Stom et al., 2021; Ikiriko, Chukwumati, 2023). Наиболее экологичным и перспективным способом очистки почв признан биологический метод, включающий в себя применение микроорганизмов. Они способны расщеплять нефтяные углеводороды вплоть до воды и углекислого газа. Спектр микроорганизмов, участвующих в деструкции углеводородов нефти, крайне широк. Он включает в себя, в частности, бактерии родов *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Acinetobacter*, *Aeromonas*, *Arthrobacter*, *Rhodococcus*; дрожжи рода *Candida*; микромицеты *Fusarium*, *Mucor*, *Trichoderma*, *Rhizopus*, *Penicillium* и др. (Льонг и др., 2016; Nandini et al., 2023).

Наиболее известными на российском рынке и хорошо зарекомендовавшими себя являются препараты марок «Дестройл», «Путидойл», а в последние годы – препарат «DOP-UNI» (ООО «Лаборатория микробных технологий» (ООО «ЛМТ»)) (Деструкторы нефти, 2020).

Целью данной статьи было оценить влияние нефтеразрушающего биопрепарата «DOP-UNI» на изменение капиллярной влагоемкости и фитотоксичности почв, загрязненных нефтью и дизельным топливом, при краткосрочном (3 недели) воздействии, в том числе в условиях пониженных температур.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В качестве материала исследования были использованы образцы серой лесной почвы, отобранной на территории Ботанического сада Иркутского государственного университета. Серая лесная почва характеризовалась слабокислой реакцией (рН 6.3) верхней части профиля и нейтральной в нижней (рН 7.0).

Для моделирования нефтезагрязнения почвы в экспериментах брали нефть Марковского месторождения Иркутской области и дизельное топливо (летний сорт, ГОСТ 305-2013).

Очистку нефтезагрязненных почвенных образцов осуществляли нефтеразрушающим биопрепаратом DOP-UNI (разработчик – Институт микробиологии РАН (кандидат биологических наук И. А. Борзенков), выпускает ООО «Лаборатория микробных технологий»). Этот продукт предназначен для биodeградации нефти и нефтепродуктов при загрязнении почв, водоемов и стоков промышленных предприятий. Он представляет собой порошок, состоящий из сухих агрегатов жизнеспособных клеток микроорганизмов, растущих на углеводородах различных классов и некоторых их производных. Обсуждаемая ассоциация микроорганизмов родов *Candida*, *Dietzia*, *Rhodococcus*, *Pseudomonas*, *Acinetobacter* придает данному препарату ряд преимуществ перед другими способами биологической очистки. Он работает в толще нефти и нефтепродуктов; устойчив к резким колебаниям температуры; активен при химическом загрязнении среды; адаптирован к повышенной солености (Борзенков, Сердюков, 2017; Борзенков и др., 2018; Деструкторы нефти, 2020).

В экспериментальные образцы серой лесной почвы приливали нефть либо дизельное топливо в концентрациях 50, 150 и 300 мл/кг и тщательно перемешивали. Образцы почвы навеской по 100 г в трех повторностях распределяли в пластиковые контейнеры объемом 250 мл. В загрязненные почвенные образцы добавляли биопрепарат нефтеокисляющих микроорганизмов «DOP-UNI» (0.1 г/кг почвы). Внесение препарата осуществляли в виде его водной суспензии, приготовленной с добавлением диаммоний фосфата в соответствии с п. 3 Инструкции к препарату (на 1 кг почвы – 0.1 г препарата, 0.2 г диаммоний фосфата, 50 мл воды). Все испытуемые пробы экспонировали в пластиковых емкостях в течение 3 недель при двух температурах: 20 и 10°C. При этом каждые сутки измеряли влажность влагомером MC-7828 SOIL (KHP, AZ Instrument) и поддерживали ее на уровне около 60%. После экспонирования определяли капиллярную влагоемкость почвенных образцов термостатно-весовым методом (Козлова, 2012; Bandyopadhyay et al., 2012). Для этого почву просеивали через сито в 1-2 мм и при легком постукивании (для уплотнения) небольшими порциями засыпали почву в предварительно взвешенную стеклянную трубку, вставленную в ситечко с фильтром. Трубку прибора заполняли так, чтобы сверху оставалось не заполнено почвой около 1 см. Трубку с заполненной почвой взвешивали и устанавливали в ванну (чашку Петри) с дистиллированной водой. В почве делали углубление (не вынимая трубки из чашки) и

ИЗМЕНЕНИЕ КАПИЛЛЯРНОЙ ВЛАГОЕМКОСТИ

трубку оставляли стоять 15 мин, пока в углублении не появлялась вода. Через 15 мин делали взвешивание трубки с мокрой почвой. Расчет капиллярной влагоемкости (КВ) проводили по формуле:

$$\text{КВ (\%)} = \frac{P_2 - P_1}{P_1 - C} \times 100,$$

где C – масса сухого цилиндра, P_1 – масса трубки с сухой почвой, P_2 – масса почвы и трубки после насыщения водой.

Оценку показателя капиллярной влагоемкости проводили по градации Н. А. Качинского, согласно которой 40 – 50% считается наилучшей, 30 – 40% – хорошей, 25 – 30% – удовлетворительной, менее 25% – неудовлетворительной (Качинский, 1965). В качестве контроля использовали образцы почвы без добавления нефти и биопрепарата.

Оценку токсичности нефтезагрязненных субстратов осуществляли по прорастанию семян кресс-салата *Lepidium sativum* (Олькова и др., 2016). В чашки Петри помещали по 20 г испытуемого почвенного образца, равномерно распределяя его по дну чашки. В почву вносили семена кресс-салата в количестве 20 шт. Контролем служила незагрязненная почва. Через 7 сут. подсчитывали число проросших семян и среднюю длину корней проростков.

Эксперименты проводили не менее чем в трех независимых опытах, в экспериментах с капиллярной влагоемкостью – с 3-4 параллельными измерениями, в опытах по фитотоксичности – не менее чем с 20 параллельными измерениями.

Было рассчитано среднее арифметическое, так как при нормальном распределении исследуемого признака (как в нашем случае) именно этот параметр является наиболее вероятным значением измеряемой величины. На графиках приведены значения среднего арифметического и стандартное отклонение среднего арифметического (или средняя квадратичная ошибка). Достоверность различия результатов определяли с помощью критерия Стьюдента (T_{st}). Выводы сделаны с вероятностью безошибочного прогноза $P \geq 0.95$.

Статистическая обработка выполнена в пакетах программ MS Excel 2010 (Microsoft Corp.).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Показатель капиллярной влагоемкости серой лесной почвы без дополнительной обработки был равен $62.1 \pm 1.0\%$. Это соответствует наилучшей капиллярной влагоемкости. После добавления нефти (50 мл/кг) в исходный образец почвы исследуемый показатель снизился до $22.6 \pm 1.1\%$ ($T_{st} = 26.6$, $p < 0.001$) как при 10°C (рис. 1), так и 20°C (рис. 2). Данное значение уже свидетельствует о неудовлетворительной капиллярной влагоемкости. В результате 3-недельной обработки нефтезагрязненной почвы биопрепаратом «DOP-UNI» (0.1 г/кг почвы) показатель капиллярной влагоемкости через 3 недели повысился и стал равен 30% как при 20°C ($T_{st} = 6.48$, $p < 0.001$), так и при 10°C ($T_{st} = 7.00$, $p = 0.001$). При этом определяемый параметр оставался ниже контрольного образца на 31%.

После добавления в исходный образец почвы 150 мл/кг нефти капиллярная влагоемкость снижалась до $19.1 \pm 1.6\%$ ($T_{st} = 22.8$, $p < 0.001$) при 10 и 20°C , т.е. ка-

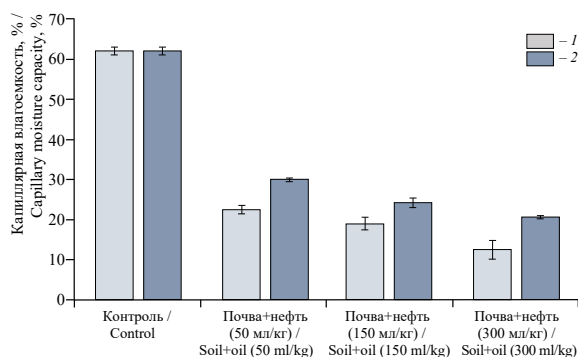


Рис. 1. Капиллярная влагоемкость серой лесной почвы, загрязненной нефтью (50, 150 и 300 мл/кг), до (1) и после (2) 3-недельной обработки биопрепаратом DOP-UNI (0.1 г/кг почвы) при 10°C

Fig. 1. Capillary moisture capacity of gray forest soil contaminated with oil (50, 150 and 300 ml/kg) before (1) and after (2) 3-week treatment with DOP-UNI (0.1 g/kg of soil) at 10°C

неудовлетворительной капиллярной влагоемкости. При внесении биопрепарата «DOP-UNI» (0.1 г/кг почвы) показатель повысился до $20.6 \pm 0.3\%$ при 10°C ($T_{st} = 3.45$, $p = 0.003$) и до $22.4 \pm 1.0\%$ при 20°C ($T_{st} = 3.90$, $p = 0.001$). При этом он все же не достигал значений контрольного образца. Таким образом, показатель капиллярной

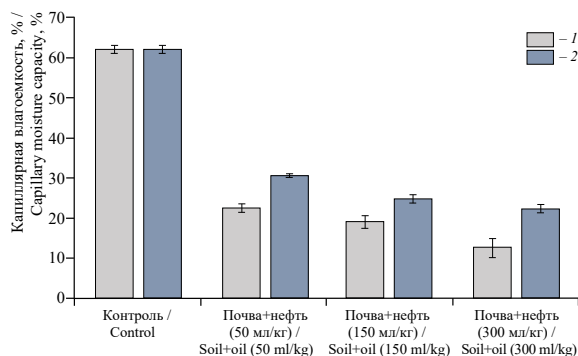


Рис. 2. Капиллярная влагоемкость серой лесной почвы, загрязненной нефтью (50, 150 и 300 мл/кг), до (1) и после (2) 3-недельной обработки биопрепаратом DOP-UNI (0.1 г/кг почвы) при 20°C

Fig. 2. Capillary moisture capacity of gray forest soil contaminated with oil (50, 150 and 300 ml/kg) before (1) and after (2) 3-week treatment with DOP-UNI (0.1 g/kg of soil) at 20°C

пиллярная влагоемкость становилась неудовлетворительной. При внесении биопрепарата «DOP-UNI» (0.1 г/кг почвы) после 3-недельной экспозиции показатель повысился до $24.2 \pm 1.2\%$ при 10°C ($T_{st} = 2.60$, $p = 0.02$) и $24.2 \pm 1.2\%$ при 20°C ($T_{st} = 3.02$, $p = 0.01$). Вместе с тем его значение оставалось ниже контрольного образца на 37.3%. Это соответствовало неудовлетворительной капиллярной влагоемкости.

После добавления в исходный образец почвы нефти (300 мл/кг) определяемый показатель снизился до $12.6 \pm 2.3\%$ при 10 и 20°C ($T_{st} = 19.70$, $p < 0.001$), что соответствовало неудовлетворительной капиллярной влагоемкости почвы, загрязненной нефтью, остался с неудовлетворительным значением (см. рис. 1, 2).

Следует отметить, что в описанных 3-недельных экспериментах экспонирование почвенных образцов, обработанных микробиологическим препаратом при пониженной температуре (10°C), не вызывало значимых отличий в изменении анализируемых агрофизических параметров по сравнению с опытом при 20°C. Например, под действием биопрепарата при 20°C капиллярная влагоемкость нефтезагрязненной почвы увеличивалась по сравнению с необрабо-

танной нефтезагрязненной почвой в 1.3 раза (при уровне загрязнения нефтью 50 и 150 мл/кг почвы) и в 1.8 раза (при 300 мл/кг нефти) (см. рис. 2). В аналогичном опыте, проводимом при 10°C, интенсивность восстановления исследуемой агрофизической характеристики была схожей. При уровне загрязнения нефтью 50 и 150 мл/кг почвы капиллярная влагоемкость нефтезагрязненной почвы после обработки препаратом увеличивалась в 1.3 раза, при 300 мл/кг – в 1.6 раза относительно необработанной препаратом загрязненной почвенной пробы (см. рис. 1).

Подобные эксперименты проводили при загрязнении почвы дизельным топливом в концентрациях 50, 150 и 300 мл/кг. Параметр капиллярной влагоемкости контрольного образца серой лесной почвы, как и в первой серии опыта, был равен 62%, что соответствовало наилучшей капиллярной влагоемкости. После добавления дизельного топлива (50 мл/кг) в исходный образец почвы его значение снижалось до $28.3 \pm 2.0\%$ как при 10°C, так и 20°C ($T_{st} = 15.10$, $p < 0.001$), что соответствовало удовлетворительной капиллярной влагоемкости. В результате 3-недельной обработки почвы биопрепаратом «DOP-UNI» (0.1 г/кг почвы) этот показатель повысился до $33.8 \pm 1.0\%$ при 10°C ($T_{st} = 2.56$, $p = 0.02$) (рис. 3), $38.0 \pm 1.2\%$ при 20°C ($T_{st} = 4.16$, $p < 0.001$) (рис. 4), но все же остался ниже контрольного образца на 28%.

В присутствии дизельного топлива (150 мл/кг) в исходном образце почвы капиллярная влагоемкость уменьшилась и стала $20.0 \pm 0.2\%$ при обеих исследуемых температурах ($T_{st} = 41.30$, $p < 0.001$). Следовательно, при этой концентрации она должна оцениваться как неудовлетворительная. При внесении биопрепарата «DOP-UNI» (0.1 г/кг почвы) анализируемый показатель повысился и стал равен $33.1 \pm 1.6\%$ при 10°C ($T_{st} = 8.12$, $p < 0.001$) (см. рис. 3), $35.3 \pm 1.6\%$ при 20°C ($T_{st} = 9.49$, $p < 0.001$) (см. рис. 4), что соответствует хорошей капиллярной влагоемкости. Вместе с тем он оставался на 26% ниже значений, определяемых в контрольном образце.

После внесения дизельного топлива (300 мл/кг) в исходный образец почвы определяемый показатель снизился до $13.8 \pm 0.7\%$ при 10 и 20°C ($T_{st} = 39.60$, $p < 0.001$), после этого капиллярная влагоемкость стала неудовлетворительной. При внесении биопрепарата «DOP-UNI» (0.1 г/кг почвы) измеряемый показатель повысился до $28.6 \pm 0.5\%$ при 10°C ($T_{st} = 17.20$, $p < 0.001$), $27.6 \pm 0.6\%$ при 20°C ($T_{st} = 14.97$, $p < 0.001$), капиллярная влагоемкость становилась удовлетворительной, но все же была ниже показателя контрольного образца на 34% (см. рис. 3, 4).

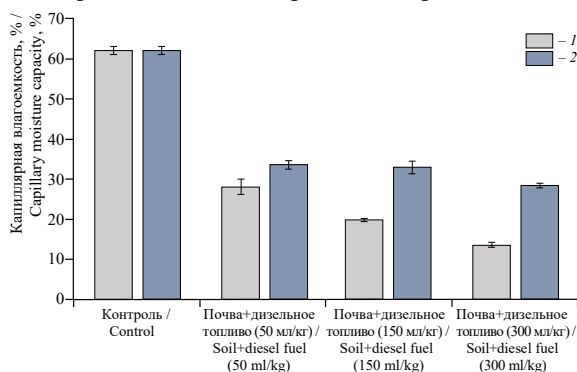


Рис. 3. Капиллярная влагоемкость серой лесной почвы, загрязненной дизельным топливом (50, 150 и 300 мл/кг), до (1) и после (2) 3-недельной обработки биопрепаратом DOP-UNI (0.1 г/кг почвы) при 10°C

Fig. 3. Capillary moisture capacity of gray forest soil contaminated with diesel fuel (50, 150 and 300 ml/kg) before (1) and after (2) 3-week treatment with DOP-UNI (0.1 g/kg of soil) at 10°C

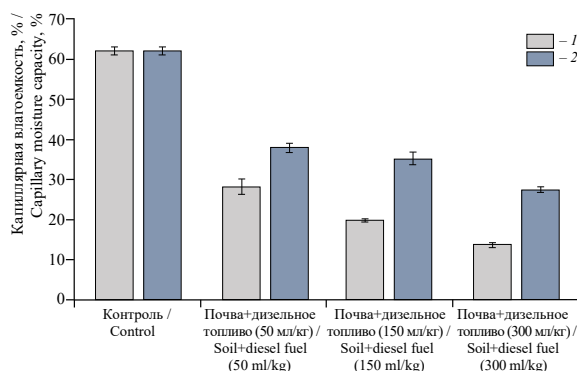


Рис. 4. Капиллярная влагоёмкость серой лесной почвы, загрязнённой дизельным топливом (50, 150 и 300 мл/кг), до (1) и после (2) 3-недельной обработки биопрепаратом DOP-UNI (0.1 г/кг почвы) при 20°C

Fig. 4. Capillary moisture capacity of gray forest soil contaminated with diesel fuel (50, 150 and 300 ml/kg) before (1) and after (2) 3-week treatment with DOP-UNI (0.1 g/kg of soil) at 20°C

Таким образом, биопрепарат «DOP-UNI» за 3 недели вызывал положительное увеличение (примерно в 1.3 – 2.0 раза) капиллярной влагоёмкости по сравнению с загрязнёнными дизельным топливом почвенными образцами, не обработанными биопрепаратом. Однако при этом значения этой агрофизической характеристики оставались ниже исходных. Наши эксперименты были довольно краткосрочные – 3 недели. Возможно, что при удлинении экспозиции удалось бы достичь большей степени восстановления определяемой агрофизической характеристики нефтезагрязнённой почвы.

Наряду с исследованием агрофизических свойств почвы, оценивали изменение фитотоксичности почвенных образцов, загрязнённых нефтью и дизельным топливом, после обработки их биопрепаратом DOP-UNI в течение 3 недель при температуре 10 и 20°C. Результаты этих экспериментов также продемонстрировали определённую эффективность биопрепарата при биоремедиации, в том числе при пониженной температуре. Длина корней проростков семян в почвенных нефтезагрязнённых пробах, обработанных микроорганизмами, была выше, чем в аналогичных образцах без внесения микроорганизмов.

Так, при нефтяном загрязнении 150 г/кг исследуемый тест-параметр возрастал в 1.2 – 1.3 раза после обработки биопрепаратом (как при 10°C, так и при 20°C). При более низком уровне загрязнения (нефть 50 г/кг) и температуре экспонирования проб 20°C длина проростков семян в почве, обработанной микроорганизмами, была в 1.5 раза выше, чем в необработанном нефтезагрязнённом образце (3.5 ± 0.2 см и 2.3 ± 0.2 см соответственно). Следует отметить, что почвенный образец, содержащий 50 г/кг нефти, после обработки микроорганизмами не только не ингибировал рост семян, но и стимулировал его. В этом случае длина корней проростков составила 3.5 ± 0.2 см, в то время как в контроле (незагрязнённая почва) – 2.6 ± 0.3 см ($T_{st} = 2.50$, $p = 0.05$) (табл. 1).

Эксперименты продемонстрировали эффективность работы биопрепарата DOP-UNI и при очистке почв, загрязнённых дизельным топливом. Так, в почвенном образце, содержащем 50 г/кг этого нефтепродукта, после 3 недель экспонирования с микроорганизмами длина корней проростков семян составляла 5.5 ± 0.4 см (при 10°C) и 3.7 ± 0.3 см (при 20°C), в то время как без добавления DOP-UNI анализируемый ростовой параметр был значительно ниже: 2.2 ± 0.2 см (при 10°C) и 1.4 ± 0.1 см (при 20°C).

ИЗМЕНЕНИЕ КАПИЛЛЯРНОЙ ВЛАГОЕМКОСТИ

Таблица 1. Изменение фитотоксичности почвы, загрязненной нефтью (50 и 150 г/кг), после ее обработки биопрепаратом DOP-UNI (0.1 г/кг почвы) в течение 3 недель при температуре 10 и 20°C

Table 1. Change in the phytotoxicity of oil-contaminated soil (50 and 150 g/kg) after its treatment with DOP-NI (0.1 g/kg of soil) for 3 weeks at temperatures of 10 and 20°C

Концентрация нефти / Oil concentration	Температура / Temperature	Длина корней проростков, см / Root length of seedlings, cm		Всхожесть, % от контроля (незагрязненная почва) (экспозиция семян в почве – 7 сут) / Germination, % of control (uncontaminated soil) (7-day seed exposure in the soil)	
		без DOP-UNI / without DOP-UNI	с DOP-UNI / with DOP-UNI	без DOP-UNI / without DOP-UNI	с DOP-UNI / with DOP-UNI
50 г/кг / 50 g/kg	10°C	1.6±0.1	1.8±0.1	94	96
		$T_{st} = 1.41, p = 0.20$			
		2.3±0.2	3.5±0.2		
	20°C	$T_{st} = 4.24, p < 0.001$		81	94
150 г/кг / 150 g/kg	10°C	0.8±0.1	1.1±0.1	55	70
		$T_{st} = 2.12, p = 0.05$			
		2.0±0.1	2.5±0.2		
	20°C	$T_{st} = 2.24, p = 0.04$		64	72
Контроль (незагрязненная почва) / Control (unpolluted soil)		2.6±0.3		100	

Более высокое загрязнение почвы дизельным топливом (150 г/кг) снижало эффективность работы биопрепарата. В этом случае длина корней проростков тест-растений в почвенных пробах, обработанных и необработанных микроорганизмами, достоверно не отличалась (табл. 2).

Таблица 2. Изменение фитотоксичности почвы, загрязненной дизельным топливом (50 и 150 г/кг), после ее обработки биопрепаратом DOP-UNI (0.1 г/кг почвы) в течение 3 недель при температуре 10 и 20°C

Table 2. Change in the phytotoxicity of the soil contaminated with diesel fuel (50 and 150 g / kg) after its treatment with DOP-UNI (0.1 g / kg of soil) for 3 weeks at temperatures of 10 and 20°C

Концентрация дизельного топлива / Diesel fuel concentration	Температура / Temperature	Длина корней проростков, см / Root length of seedlings, cm		Всхожесть, % от контроля (неза- грязненная почва) (экспозиция семян в почве – 7 сут) / Germina- tion, % of control (uncontaminated soil) (7-day seed exposure in the soil)	
		без DOP-UNI / without DOP-UNI	с DOP-UNI / with DOP-UNI	без DOP-UNI / without DOP-UNI	с DOP-UNI / with DOP-UNI
50 г/кг / 50 g/kg	10°C	2.2±0.2	5.5±0.4	60	74
		$T_{st} = 7.38, p < 0.001$			
	20°C	1.4±0.1	3.7±0.3	67	68
		$T_{st} = 7.27, p < 0.001$			
150 г/кг / 150 g/kg	10°C	0.8±0.1	0.8±0.1	63	87
		—			
	20°C	0.7±0.1	0.8±0.1	67	87
		$T_{st} = 0.71, p > 0.05$			
Контроль (незагрязненная поч- ва) / Control (unpolluted soil)		2.3±0.3		100	

Таким образом, при уровне загрязнения почвы дизельным топливом 150 г/кг значительно снижалась эффективность работы биопрепарата DOP-UNI: степень фитотоксичности почвы за 3 недели экспонирования с микроорганизмами не изменялась. При аналогичном содержании нефти в почве наблюдалось уменьшение в 1.2 – 1.3 раза ее фитотоксичности.

Как и ожидалось, пониженная температура (10°C) несколько уменьшала эффективность работы микроорганизмов биопрепарата DOP-UNI при очистке почв от нефти, однако не подавляла ее полностью (см. табл. 1). Более того, при моделировании загрязнения почвенных проб дизельным топливом (50 г/кг) подобного снижения эффективности очистки не наблюдали (см. табл. 2).

Снижение капиллярной влагоемкости почв в результате действия нефти и нефтепродуктов отмечали и другие авторы. Так, по данным М. Ю. Гилязова и И. А. Гайсина (2003), в почве, содержавшей 3.12% нефти, капиллярная влагоемкость снижалась в 3.21 раза по сравнению с незагрязненной почвой. В исследованиях А. В. Леднева (2008) показано, что с увеличением степени загрязнения нефтью (10%) в почве резко ухудшаются ее водные характеристики. Происходит уменьшение полевой, максимальной гигроскопической (с 2.27 (контроль) до 1.66%), гигроскопической влажности (с 1.69 до 1.24%) и капиллярной влагоемкости (с 21.4 до 18.3%). Это связано, прежде всего, с тем, что нефть резко увеличивает гидрофобность поверхности механических элементов и структурных отдельных частей. Вследствие чего вода сложнее проникает в почвенные агрегаты. Поэтому она не впитывается в почву, а стекает по ее поверхности или просачивается в нижние горизонты по крупным порам. Другой возможной причиной снижения влагоемкости почвы является заполнение и закупорка нефтепродуктами макро- и микропор в почвенной толще. Так, в работе (Леднев, 2008) общая порозность нефтезагрязненной почвы вследствие этого снижалась на 20 – 34%. О негативном влиянии нефтяного загрязнения на почвы сообщали и другие авторы (Uzoije, Agunwamba, 2011; Sar-madi et al., 2019; Khoshgofar et al., 2021).

Внесение в нефтезагрязненные почвы препарата нефтеокисляющих микроорганизмов «DOP-UNI» способствует снижению токсичности экотоксикантов, ускорению процессов биохимического разложения органических токсикантов и восстановлению плодородия почв и растительного покрова на загрязненных и нарушенных территориях (Тавадзе, 2023). В работе (Туйкина, Мазлова, 2021) продемонстрирована эффективность биопрепарата «DOP-UNI» в процессах биодеструкции углеводородов в образцах бурового шлама Уренгойского месторождения. Т. В. Минниковой с соавторами (2017) показана стимуляция активности каталазы и пероксидазы при введении в нефтезагрязненную почву комплекса «DOP-UNI» с гуматом калия. Внесение биопрепарата в нефтезагрязненный чернозем обеспечивало сбалансированные процессы гумификации и минерализации. Наряду с другими авторами, полученные нами в данной работе результаты свидетельствуют об эффективности применения биопрепарата «DOP-UNI» в ремедиации нефтезагрязненных почв, даже при краткосрочной экспозиции. В течение всего трех недель препарату удавалось частично восстановить исследуемый агрофизический параметр почвы (капиллярную влагоемкость) при довольно высоком уровне загрязне-

ИЗМЕНЕНИЕ КАПИЛЛЯРНОЙ ВЛАГОЕМКОСТИ

ния почвы нефтью и дизельным топливом (50 – 300 мл/кг), а также снизить (примерно на 20%) фитотоксичность почвы при уровне ее нефтезагрязнения до 150 г/кг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, загрязнение серых лесных почв нефтью и дизельным топливом в концентрациях 50, 150 и 300 мл/кг приводило к снижению капиллярной влагоемкости. Так, при загрязнении нефтью этот показатель снижался с $62.1 \pm 1.0\%$ (соответствует наилучшей капиллярной влагоемкости) до $22.6 \pm 1.1\%$ при внесении 50 мл/кг нефти, до $19.1 \pm 1.6\%$ при 150 мл/кг нефти и до $12.6 \pm 2.3\%$ при 300 мл/кг нефти. Действие дизельного топлива на капиллярную влагоемкость почвы было аналогичным. Внесение 50 мл/кг дизельного топлива приводило к уменьшению исследуемого показателя с 62.1 до $28.3 \pm 2.0\%$, 150 мл/кг – до $20.0 \pm 0.2\%$, а 300 мл/кг – до $13.8 \pm 0.7\%$. При этом температурный режим экспозиции не оказывал влияния на этот параметр: указанные выше изменения наблюдали в почвенных образцах, обработанных нефтью и дизельным топливом как при 10°C, так и при 20°C.

Даже в результате краткосрочной (3 недели) обработки загрязненной почвы микробным нефтеразрушающим препаратом «DOP-UNI» удавалось частично восстановить исследуемые в работе агрофизические характеристики. За такое время экспозиции капиллярная влагоемкость почвы, загрязненной нефтью (50 – 300 мл/кг), после обработки биопрепаратом повышалась в 1.3 – 1.8 раза по сравнению с необработанным нефтезагрязненным образцом. Подобная тенденция отмечена в эксперименте с дизельным топливом. Кроме того, обработка нефтезагрязненной почвы биопрепаратом DOP-UNI уже в течение 3 недель приводила к снижению (примерно на 20%) фитотоксичности при уровне нефтезагрязнения до 150 г/кг.

Полученные материалы свидетельствуют о перспективности использования нефтеразрушающего препарата «DOP-UNI» для ремедиации почв при загрязнении нефтепродуктами и восстановления агрофизических свойств нефтезагрязненных почв.

Следует отметить, что в описанных 3-недельных экспериментах понижение температуры до 10°C не оказывало значительного влияния на эффективность работы биопрепарата. Это свидетельствует о возможности применения биопрепарата DOP-UNI в условиях пониженных температур в основных местах нефтедобычи РФ.

Авторы признательны за ценные консультации доктору биологических наук А. А. Козловой и кандидату биологических наук И. А. Борзенкову.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Борзенков И. А., Сердюков Д. В. Биорекультивация жидких нефтешламов и асфальтосмолопарафиновых отложений в засушливых условиях // Экология производства. 2017. № 8. С. 113 – 119.

Борзенков И. А., Канапацкий Т. А., Литти Ю. В., Сердюков Д. В., Насонов П. А., Мейлах И. К. Переработка органических отходов с высоким содержанием нефтеуглеводородов // Экология производства. 2018. № 12. С. 44 – 51.

Гилязов М. Ю., Гайсин И. А. Агроэкологическая характеристика и приемы рекультивации нефтезагрязненных черноземов Республики Татарстан. Казань: Фэн, 2003. 228 с.

Деструкторы нефти // ООО «Лаборатория микробных технологий». М., 2020. URL: https://dop-uni.ru/destructor_of_oil_pollution (дата обращения: 02.05.2023).

Замотаев И. В., Иванов И. В., Михеев П. В., Никонова А. Н. Химическое загрязнение и трансформация почв в районах добычи углеводородного сырья (обзор литературы) // Почвоведение. 2015. № 12. С. 1505 – 1518. <https://doi.org/10.7868/S0032180X1512014X>

Качинский Н. А. Физика почв. М.: Высшая школа, 1965. Ч. 1. 324 с.

Козлова А. А. Физика почв. Иркутск: Изд-во Иркутского государственного университета, 2012. 147 с.

Леднев А. В. Изменение свойств дерново-подзолистых суглинистых почв под действием загрязнения продуктами нефтедобычи и приемы их рекультивации: дис. ... д-ра сельскохозяйственных наук. Ижевск, 2008. 378 с.

Льонг Т. М., Нечаева И. А., Петриков К. В., Пунтус И. Ф., Понаморева О. Н. Бактерии-нефтедеструкторы рода *Rhodococcus* – потенциальные продуценты биосурфактантов // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2016. № 1. С. 50 – 60.

Минникова Т. В., Денисова Т. В., Колесников С. И., Акименко Ю. В. Оценка активности оксидоредуктаз нефтезагрязненного чернозема при мелиорации глауконитом, «DOP-UNI» и гуматом калия // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. Т. 19, № 2. С. 307 – 311.

Олькова А. С., Березин Г. И., Ашихмина Т. Я. Оценка состояния почв городских территорий химическими и эколого-токсикологическими методами // Поволжский экологический журнал. 2016. № 4. С. 411 – 423.

Тавадзе Б. Д. Влияние биодефекторов в процессе детоксикации поллютантов на загрязненных почвах // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2023. № 4. С. 29 – 35. <https://doi.org/10.17513/mjpf.13527>

Топчий И. А., Стом Д. И., Доница К. Ю., Алферов С. В., Нечаева И. А., Купчинский А. Б., Огарков Б. Н., Петрова Ю. Ю., Антонова Е. В. Использование поверхностно-активных веществ в биодеградации гидрофобных соединений: обзор // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2022. Т. 12, № 4. С. 521 – 537. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-4-521-537>

Туйкина А. В., Мазлова Е. А. Обезвреживание бурового шлама в открытых и герметичных контейнерах окислительным методом // Химия, экология и рациональное природопользование: материалы Международной научно-практической конференции. Махачкала: АЛЕФ, 2021. С. 312 – 317.

Успанова Д. М., Мурзина Ю. И., Коробейникова А. С., Петерсон А. М., Глинская Е. В., Арефьев К. А., Нечаева О. В. Биоремедиационный потенциал аборигенных микроорганизмов чернозема южного // Поволжский экологический журнал. 2022. № 2. С. 216 – 231. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2022-2-216-231>

Щемелинина Т. Н., Анчугова Е. М. Комплексная биотехнология очистки нефтезагрязненной почвы // Поволжский экологический журнал. 2023. № 2. С. 246 – 256. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-246-256>

Abdallah A. H., Elhussain A. A., Ibrahim D. A. Biodegradation of crude oil contaminated soil in Sudan using sudanese plant *Acacia seyal* Del. // International Journal of Plant & Soil Science. 2023. Vol. 35, iss. 8. P. 171 – 180. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i82893>

Bandyopadhyay K. K., Aggarwal P., Chakraborty D., Pradhan S., Garg R. N., Singh R. Practical Manual on Measurement of Soil Physical Properties. New Delhi: Indian Agricultural Research Institute, 2012. 62 p.

Chachina S. B., Voronkova N. A., Gross M. A., Chachina E. P. Vermiculization of oil-contaminated soils using vermiculture of earthworms and microorganisms *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus subtilis*, *Rhodococcus* // AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2784, iss. 1. Article number 070001. <https://doi.org/10.1063/5.0140364>

Ikiriko M. E., Chukwumati J. A. Phytoremediation potential of *Ficus benjamina* on soils contaminated with crude oil in Rivers State, South-South Nigeria // World Journal of Agriculture and Soil Science. 2023. Vol. 8, № 4. Article number WJASS.MS.ID.000693. <https://doi.org/10.33552/WJASS.2023.08.000693>

Khoshgofar A., Khodaparast M., Sedighi M. Effect of residues from a burnt oil refinery on the compaction parameters and strength of clayey sand // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2021. Vol. 80, iss. 8. P. 6331 – 6341. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02320-4>

Nikolaev Y., Borzenkov I., Demkina E., Loiko N., Kanapatsky T., Grigoreva N., El-Registan G., Perminova I., Volikov A., Khreptugova A., Bliznetc I. Immobilization of cells of hydrocarbon-oxidizing bacteria for petroleum bioremediation using new materials // International Journal of Environmental Research. 2021. Vol. 15, iss. 6. P. 971 – 984. <https://doi.org/10.1007/s41742-021-00367-5>

Nandini R., Amuthavallinayaki M., Sangameswaran R., Arthe R. A review on nano enhanced bioremediation of toxic contaminants in the environment // International Journal of Modern Developments in Engineering and Science. 2023. Vol. 2, № 6. P. 28 – 34.

Park J. Evaluation of changes in the permeability characteristics of a geotextile–polynorbornene liner for the prevention of pollutant diffusion in oil-contaminated soils // Sustainability. 2021. Vol. 13, iss. 9. Article number 4797. <https://doi.org/10.3390/su13094797>

Prabhu A. A., Chityala S., Jayachandran D., Naik N., Dasu V. V. Rhizoremediation of environmental contaminants using microbial communities // Plant-Microbe Interactions in Agro-Ecological Perspectives / eds. D. Singh, H. Singh, R. Prabha. Singapore: Springer, 2017. P. 433 – 453. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6593-4_17

Sarmadi M. S., Zohrevand P., Rezaee M. Effect of kerosene contamination on the physical and mechanical properties of sandy soil // Innovative Infrastructure Solutions. 2019. Vol. 4. Article number 7. <https://doi.org/10.1007/s41062-019-0196-1>

Stom D. I., Matveeva O. N., Zhdanova G. O., Ponamoreva O. N., Kupchinsky A. B., Tolstoy M. Yu., Vardanyan N. S., Saksonov M. N., Chesnokova A. N., Wang L., Ge Sh. Transformation of oil and hexadecane in soil by microbial preparations and earthworms // Bioremediation Journal. 2021. Vol. 25, iss. 2. P. 159 – 168. <https://doi.org/10.1080/10889868.2020.1860894>

Tang K. H. D., Juan A. Phytoremediation of crude oil-contaminated soil with local plant species // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 495. Article number 012054. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/495/1/012054>

Uzoije A. P., Agunwamba J. C. Physiochemical properties of soil in relation to varying rates of crude oil pollution // Journal of Environmental Science and Technology. 2011. Vol. 4, iss. 3. P. 313 – 323. <https://doi.org/10.3923/jest.2011.313.323>

Change in the capillary moisture capacity and phytotoxicity of oil-contaminated soils under the influence of the oil-destructive biological product “DOP-UNI” in a short-term experiment

M. B. Ryumin¹, D. I. Stom^{1-4✉}, A. E. Balayan¹, O. G. Lopatovskaya¹,
G. O. Zhdanova^{2,4}, A. B. Kupchinsky², Yu. Yu. Petrova⁴, M. N. Saksonov¹

¹ Irkutsk State University

1 Karl Marx St., Irkutsk 664003, Russia

² Baikal Museum of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

1 Akademicheskaya St., Listvyanka village, Irkutsk region 664520, Russia

³ Irkutsk National Research Technical University

83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

⁴ Surgut State University,

22 Energetikov St., Surgut 628412, Russia

Received: September 13, 2023 / revised: May 11, 2024 / accepted: May 15, 2024 / published: March 31, 2025

Abstract. The contamination of gray forest soils with oil and diesel fuel at concentrations of 50, 150 and 300 ml/kg is shown to lead to a decrease in their capillary moisture capacity. When applying 50, 150 and 300 ml/kg of oil, this indicator decreased from 62 (corresponds to the best capillary moisture capacity) down to 22.6, 19.1 and 12.6%, respectively. The effect of diesel fuel on the capillary moisture capacity of the soil was similar. In the presence of 50, 150 and 300 ml/kg of this oil product, the capillary moisture capacity of the soil decreased from 62% down to 28.3, 20.0 and 13.8%, respectively. As a result of the introduction of the microbial oil-destroying preparation “DOP-UNI” and subsequent exposure for 3 weeks, it was possible to partially restore this agrophysical characteristic of the soil. Even during such a short exposure time, the capillary moisture capacity of the oil-contaminated soil (50–300 ml/kg), after treatment with the biological preparation, increased by 1.3–1.8 times compared to an untreated oil-contaminated sample. However, its values still remained lower than in uncontaminated soil samples. A similar trend was noted in our experiment with diesel fuel. In addition, the treatment of oil-contaminated soil with the biological preparation “DOP-UNI” for 3 weeks led to a decrease (by ~20%) in phytotoxicity at the level of oil contamination up to 150 g/kg. The obtained data allow us to judge the prospects of using the biopreparation “DOP-UNI” for soil remediation in the case of contamination with petroleum products and restoration of their agrophysical properties. At the same time, lowering the temperature down to 10°C did not significantly affect the effectiveness of the biopreparation, at least in the described 3-week experiments. This indicates the possibility of its use in low-temperature conditions, which is typical for the main oil production sites in the Russian Federation.

Keywords: oil pollution of soils, oil-oxidizing microorganisms, biological preparation DOP-UNI, capillary moisture capacity of soils, phytotoxicity

✉ Corresponding author. Laboratory of Aquatic Toxicology of the Research Institute of Biology, Irkutsk State University, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Maxim B. Ryumin: <https://orcid.org/0009-0006-4762-4613>, maksim.ryumin@mail.ru; Devard I. Stom: <https://orcid.org/0000-0001-9496-2961>, stomd@mail.ru; Alla E. Balayan: <https://orcid.org/0009-0001-3934-9598>, 7balla@mail.ru; Olga G. Lopatovskaya: <https://orcid.org/0000-0002-5570-545X>, lopatovs@gmail.com; Galina O. Zhdanova: <https://orcid.org/0000-0002-8355-9517>, zhdanova86@ya.ru; Alexander B. Kupchinsky: <https://orcid.org/0000-0001-8884-8636>, albor67@mail.ru; Yulia Yu. Petrova: <https://orcid.org/0000-0003-3702-2249>, petrova_juju@surgu.ru; Mikhail N. Saksonov: <https://orcid.org/0000-0003-0094-2447>, msaksonov@mail.ru.

ИЗМЕНЕНИЕ КАПИЛЛЯРНОЙ ВЛАГОЕМКОСТИ

Funding: The work was carried out with the financial support of the Department of Education and Science of Khanty-Mansi Autonomous Okrug–Yugra region (project No. 2023-227-05 “Development of effective methods to accelerate the destruction of petroleum products in soil and climatic conditions of Khanty-Mansi Autonomous Okrug–Yugra region”).

Ethics approval and consent to participate: This work does not contain any studies involving human and animal subjects.

Competing interests: The authors have declared that no competing interests exist.

For citation: Ryumin M. B., Stom D. I., Balayan A. E., Lopatovskaya O. G., Zhdanova G. O., Kupchinsky A. B., Petrova Yu. Yu., Saksonov M. N. Change in the capillary moisture capacity and phytotoxicity of oil-contaminated soils under the influence of the oil-destructive biological product “DOP-UNI” in a short-term experiment. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2025, no. 1, pp. 64–79 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2025-1-64-79>

REFERENCES

- Borzenkov I. A., Serdyukov D. V. Biorecultivation of liquid oil sludge and asphalt-resin-paraffin deposits in arid conditions. *Ekologia proizvodstva*, 2017, no. 8, pp. 113–119 (in Russian).
- Borzenkov I. A., Kanapatskii T. A., Litt I. V., Serdiukov D. V., Nasonov P. A., Meilakh I. K. Recycling of organic waste with high content of petroleum hydrocarbons. *Ekologia proizvodstva*, 2018, no. 12, pp. 44–51 (in Russian).
- Gilyazov M. Yu., Gaisin I. A. *Agroekologicheskaya kharakteristika i priemy rekul'tivatsii neftezagryaznennykh chernozemov Respubliki Tatarstan* [Agroecological Characteristics and Methods of Reclamation of Oil-contaminated Chernozems of the Republic of Tatarstan]. Kazan, Fen, 2003. 228 p. (in Russian).
- Destructors of oil. LLC “Laboratory of Microbial Technology”. Moscow, 2020. Available at: https://dop-uni.ru/destructor_of_oil_pollution (accessed May 2, 2023).
- Zamotaev I. V., Nikonova A. N., Ivanov I. V., Mikheev P. V. Chemical contamination and transformation of soils in hydrocarbon production regions. *Eurasian Soil Science*, 2015, vol. 48, iss. 12, pp. 1370–1382. <https://doi.org/10.1134/S1064229315120133>
- Kachinsky N. A. *Fizika pochv* [Soil Physics]. Moscow, Vysshaya shkola, 1965, part 1. 324 p. (in Russian).
- Kozlova A. A. *Fizika pochv* [Soil Physics]. Irkutsk, Irkutsk State University Publ., 2012. 147 p. (in Russian).
- Lednev A. V. *Changes in the Properties of Sod-podzolic Loamy Soils Under the Influence of Pollution by Oil Production Products and Methods of Their Reclamation*. Diss. Dr. Sci. (Agricul.). Izhevsk, 2008. 378 p. (in Russian).
- Luong T. M., Nechaeva I. A., Petrikov K. V., Puntus I. F., Ponamareva O. N. Oil-degrading microorganisms of genus *Rhodococcus* – potential producers of biosurfactants. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*, 2016, no. 1, pp. 50–60 (in Russian).
- Minnikova T. V., Denisova T. V., Kolesnikov S. I. Assessment the activity of petropolluted chernozem oxidoreductases at melioration by glaukonite, “DOP-UNI” and humate potassium. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2017, vol. 19, no. 2, pp. 307–311 (in Russian).
- Olkova A. S., Berezin G. I., Ashikhmina T. Ya. Soil status assessment in urban areas by chemical and environmental toxicological methods. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2016, no. 4, pp. 411–423 (in Russian).

Tavadze B. D. Influence of biodestructors in the process of detoxification of pollutants on contaminated soils. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2023, no. 4, pp. 29–35 (in Russian). <https://doi.org/10.17513/mjpf.13527>

Topchiy I. A., Stom D. I., Donina K. Yu., Alferov S. V., Nechaeva I. A., Kupchinsky A. B., Ogarkov B. N., Petrova Yu. Yu., Antonova E. V. Use of surfactants in biodegradation of hydrophobic compounds: A review. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 521–537 (in Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-4-521-537>

Tuykina A. V., Mazlova E. A. Decomposition of drill sludge in open and sealed containers by oxidizing method. In: *Chemistry, Ecology and Rational Nature Management: Materials of the International Scientific and Practical Conference*. Makhachkala, ALEF, 2021, pp. 312–317 (in Russian).

Uspanova D. M., Murzina Yu. I., Korobeinikova A. S., Peterson A. M., Glinskaya E. V., Arefiev K. A., Nechaeva O. V. Bioremediation potential of native microorganisms of the southern chernozem. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2022, no. 2, pp. 216–231 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2022-2-216-231>

Shchemelinina T. N., Anchugova E. M. Integrated biotechnology for oil-polluted soil cleanup. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2023, no. 2, pp. 246–256 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-246-256>

Abdallah A. H., Elhussein A. A., Ibrahim D. A. Biodegradation of crude oil contaminated soil in Sudan using sudanese plant *Acacia seyal* Del. *International Journal of Plant & Soil Science*, 2023, vol. 35, iss. 8, pp. 171–180. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i82893>

Bandyopadhyay K. K., Aggarwal P., Chakraborty D., Pradhan S., Garg R. N., Singh R. *Practical Manual on Measurement of Soil Physical Properties*. New Delhi, Indian Agricultural Research Institute, 2012. 62 p.

Chachina S. B., Voronkova N. A., Gross M. A., Chachina E. P. Vermicultivation of oil-contaminated soils using vermiculture of earthworms and microorganisms *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus subtilis*, *Rhodococcus*. *AIP Conference Proceedings*, 2023, vol. 2784, iss. 1, article no. 070001. <https://doi.org/10.1063/5.0140364>

Ikiriko M. E., Chukwumati J. A. Phytoremediation potential of *Ficus benjamina* on soils contaminated with crude oil in Rivers State, South-South Nigeria. *World Journal of Agriculture and Soil Science*, 2023, vol. 8, no. 4, article no. WJASS.MS.ID.000693. <https://doi.org/10.33552/WJASS.2023.08.000693>

Khoshgoftar A., Khodaparast M., Sedighi M. Effect of residues from a burnt oil refinery on the compaction parameters and strength of clayey sand. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, vol. 80, iss. 8, pp. 6331–6341. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02320-4>

Nikolaev Y., Borzenkov I., Demkina E., Loiko N., Kanapatsky T., Grigoreva N., El-Registan G., Perminova I., Volikov A., Khreptugova A., Bliznetc I. Immobilization of cells of hydrocarbon-oxidizing bacteria for petroleum bioremediation using new materials. *International Journal of Environmental Research*, 2021, vol. 15, iss. 6, pp. 971–984. <https://doi.org/10.1007/s41742-021-00367-5>

Nandini R., Amuthavallinayaki M., Sangameswaran R., Arthe R. A review on nano enhanced bioremediation of toxic contaminants in the environment. *International Journal of Modern Developments in Engineering and Science*, 2023, vol. 2, no. 6, pp. 28–34.

Park J. Evaluation of changes in the permeability characteristics of a geotextile–polynorbornene liner for the prevention of pollutant diffusion in oil-contaminated soils. *Sustainability*, 2021, vol. 13, iss. 9, article no. 4797. <https://doi.org/10.3390/su13094797>

Prabhu A. A., Chityala S., Jayachandran D., Naik N., Dasu V. V. Rhizoremediation of environmental contaminants using microbial communities. In: Singh D., Singh H., Prabha R., eds. *Plant-Microbe Interactions in Agro-Ecological Perspectives*. Singapore, Springer, 2017, pp. 433–453. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6593-4_17

ИЗМЕНЕНИЕ КАПИЛЛЯРНОЙ ВЛАГОЕМКОСТИ

Sarmadi M. S., Zohrevand P., Rezaee M. Effect of kerosene contamination on the physical and mechanical properties of sandy soil. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2019, vol. 4, article no. 7. <https://doi.org/10.1007/s41062-019-0196-1>

Stom D. I., Matveeva O. N., Zhdanova G. O., Ponamoreva O. N., Kupchinsky A. B., Tolstoy M. Yu., Vardanyan N. S., Saksonov M. N., Chesnokova A. N., Wang L., Ge Sh. Transformation of oil and hexadecane in soil by microbial preparations and earthworms. *Bioremediation Journal*, 2021, vol. 25, iss. 2, pp. 159–168. <https://doi.org/10.1080/10889868.2020.1860894>

Tang K. H. D., Juan A. Phytoremediation of crude oil-contaminated soil with local plant species. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 495, article no. 012054. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/495/1/012054>

Uzoije A. P., Agunwamba J. C. Physiochemical properties of soil in relation to varying rates of crude oil pollution. *Journal of Environmental Science and Technology*, 2011, vol. 4, iss. 3, pp. 313–323. <https://doi.org/10.3923/jest.2011.313.323>