

Научная статья
УДК 573.6+631.423.2+631.432.23
EDN: XDMZZP
DOI: 10.21285/achb.968



Изменение некоторых агрофизических характеристик нефтезагрязненных почв после их обработки растворами полисорбата-80

М.Б. Рюмин*, О.Г. Лопатовская*, Д.И. Стом*****, А.Н. Чеснокова***,
О.С. Сутормин****, А.Б. Купчинский**, С.В. Алферов*****, Ю.Ю. Петрова****,
З.Б. Есимсиитова*****, В.В. Федина*****, Ю.В. Артеменко*

*Иркутский государственный университет, Иркутск, Российская Федерация

**Байкальский музей СО РАН, Листвянка, Российская Федерация

***Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Иркутск, Российская Федерация

****Сургутский государственный университет, Сургут, Российская Федерация

*****Тульский государственный университет, Тула, Российская Федерация

*****Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Республика Казахстан

*****Научный производственно-технический центр «Жалын», Алматы, Республика Казахстан

Аннотация. Целью проведенной работы являлось сопоставление влияния нефти, дизельного топлива и моторного масла на капиллярную влагоемкость и гигроскопическую влажность серой лесной почвы, а также оценка изменения этих параметров нефтезагрязненных почв после обработки полисорбатом-80. В почву вносили воду, промывной раствор (с концентрацией детергента 1, 5 и 10 г/л) и непрерывно перемешивали на шейкере (60 об/мин) в течение 1 ч при 20 °С. Показано снижение исследуемых агрофизических параметров почв при их загрязнении нефтью, дизельным топливом и моторным маслом в концентрациях 50, 150 и 300 мл/кг. При этом действие моторного масла на капиллярную влагоемкость было более выраженным, чем влияние нефти и дизельного топлива в аналогичных концентрациях, а на гигроскопическую влажность – наоборот, менее выраженным. Промывка загрязненных почв полисорбатом-80 частично восстанавливала эти агрофизические параметры, однако они оставались ниже, чем у исходных образцов. Эффективность полисорбата-80 подтверждает и снижение фитотоксичности загрязненных почвенных проб после промывки растворами детергента. При этом при уровне загрязнения почвы нефтепродуктами до 150 мл/кг более эффективными были растворы, содержащие 5 г/л полисорбата-80, а при уровне загрязнения 300 мл/кг рекомендуется повышать концентрацию детергента до 10 г/л. Рекомендуемое для проведения очистки соотношение почвы, промывного раствора и воды составляет 1:1:4 (по массе). Таким образом, продемонстрирована перспективность использования полисорбата-80 для ослабления негативного влияния нефтезагрязнения почвы.

Ключевые слова: нефтезагрязнение почв, агрофизические параметры почв, моторное масло, нефть, дизельное топливо, полисорбат-80

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № FEWG-2024-0003 «Биокаталитические системы на основе клеток микроорганизмов, субклеточных структур и ферментов в сочетании с наноматериалами».

Для цитирования: Рюмин М.Б., Лопатовская О.Г., Стом Д.И., Чеснокова А.Н., Сутормин О.С., Купчинский А.Б. [и др.]. Изменение некоторых агрофизических характеристик нефтезагрязненных почв после их обработки растворами полисорбата-80 // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2025. Т. 15. N 1. С. 67–81. DOI: 10.21285/achb.968. EDN: XDMZZP.

Changes in some agrophysical characteristics of oil-contaminated soils following their washing with polysorbate 80 solutions

Maksim B. Ryumin*, Olga G. Lopatovskaya*, Devard I. Stom*****✉,
Alexandra N. Chesnokova***, Oleg S. Sutormin****, Alexander B. Kupchinsky**,
Sergey V. Alferov*****, Yuliya Yu. Petrova*****, Zura B. Yessimsiitova*****,
Veronika V. Fedina*****, Yuliya V. Artemenko*

*Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

**Baikal Museum of the SB RAS, Listvyanka, Russian Federation

***Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

****Surgut State University, Surgut, Russian Federation

*****Tula State University, Tula, Russian Federation

*****Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan

*****Scientific Production-Technical Center "Jalyn", Almaty, Republic of Kazakhstan

Abstract. The study was aimed at comparing the effect of oil, diesel fuel, and motor oil on the capillary moisture capacity and hygroscopic moisture content of gray forest soil, as well as assessing changes in these characteristics of oil-contaminated soils following their washing with polysorbate 80. Water and a washing solution (with detergent concentrations of 1, 5, and 10 g/L) were added to the soil to be continuously mixed for 1 h at 20 °C using a shaker (60 rpm). The analyzed agrophysical characteristics of soils are shown to decrease when soils are contaminated with oil, diesel fuel, and motor oil at concentrations of 50, 150, and 300 mL/kg. The effect of motor oil on capillary moisture capacity is more pronounced than those of oil and diesel fuel at similar concentrations, while the effect on hygroscopic moisture content is, conversely, less pronounced. The washing of contaminated soils with polysorbate 80 partially restored these agrophysical characteristics; however, they remained lower than those of the original samples. The effectiveness of polysorbate 80 is also confirmed by the reduction in the phytotoxicity of contaminated soil samples following their washing with detergent solutions. At the level of oil contamination of up to 150 mL/kg, solutions containing 5 g/L of polysorbate 80 were found to be more effective, whereas at 300 mL/kg, it is recommended to increase the concentration of detergent up to 10 g/L. The recommended weight ratio of soil, washing solution, and water for soil washing is 1:1:4. Thus, the prospects for using polysorbate 80 to mitigate the negative impact of oil contamination in soil are demonstrated.

Keywords: oil contamination in soil, agrophysical characteristics of soils, motor oil, oil, diesel fuel, polysorbate 80

Funding. This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as the part of state assignment no. FEWG-2024-0003 "Biocatalytic platforms based on microbial cells, subcellular structures and enzymes in combination with nanomaterials".

For citation: Ryumin M.B., Lopatovskaya O.G., Stom D.I., Chesnokova A. N., Sutormin O.S., Kupchinsky A.B., et al. Changes in some agrophysical characteristics of oil-contaminated soils following their washing with polysorbate 80 solutions. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2025;15(1).67-81. (In Russian): DOI: 10.21285/achb.968. EDN: XDMZZP.

ВВЕДЕНИЕ

Нефть и нефтепродукты, поступая в окружающую среду, оказывают негативное влияние на компоненты экосистем [1, 2]. Они являются постоянным источником токсичного, канцерогенного и мутагенного загрязнения. Нефтепродукты деформируют структуру биоценозов, нарушают экологическое состояние почвенных покровов в целом [3]. При попадании нефтяных углеводородов в почву наблюдается трансформация морфологических и физико-химических свойств почв. По мнению ряда специалистов, конечным результатом нефтяного загряз-

нения является формирование почвенных ареалов с необычными для зональных условий чертами, зональные типы сменяются техногенными модификациями, снижается продуктивность почв вплоть до необходимости вывода загрязненных земель из сельскохозяйственного оборота [4–6].

Для рекультивации нефтезагрязненных почв значительным потенциалом обладает биоремедиация. Основная роль в этом процессе принадлежит микроорганизмам, способным к разложению нефтепродуктов. Это относительно недорогой, легкодоступный и экологически безопасный

способ [7]. Однако эффективность подобного подхода может значительно снижаться из-за неблагоприятных для микроорганизмов условий: низких температур (что особенно актуально для северных регионов), недостаточного содержания биогенных элементов (азота, фосфора и пр.), недостатка кислорода в глубинных слоях почвы и т.п. [8]. В этих случаях наиболее приемлемо применять физико-химические способы ремедиации почв [9–11]. Из таких подходов в последние годы наиболее часто стала использоваться реагентная обработка с применением поверхностно-активных веществ (ПАВ) [12–15]. Тем не менее в этом случае существует риск загрязнения окружающей среды применяемыми реагентами, что может нести дополнительную экологическую опасность. В связи с этим выбор реагента должен быть обусловлен не только его эффективностью по отношению к удалению ПАВ, но и низкой токсичностью по отношению к почвенной биоте.

Исследования, проведенные различными авторами, демонстрируют более низкую токсичность неионогенных ПАВ по сравнению с другими классами этих соединений [16, 17]. Схожие результаты были получены и в наших экспериментах по сопоставлению токсичности представителей разных классов ПАВ (анионоактивный додецилсульфат натрия, катионоактивный цетилтриметиламмония бромид, неионогенный полисорбат-80) для почвенных олигохет [18], растений [19, 20], светящихся бактерий и их ферментных систем [21].

Нефтепродукты отличаются повышенной гидрофобностью, поэтому имелись все основания ожидать, что под их воздействием почвенные частицы станут более гидрофобными, а значит, нарушится их взаимодействие с таким высокогидрофильным веществом, как вода. С другой стороны, ПАВ способны изменять гидрофобно-гидрофильные свойства поверхностей [22]. В связи с этим следовало полагать, что нефтепродукты сделают почву более гидрофобной, а ПАВ могут привести к противоположному эффекту. Такие характеристики почвы, как влагоемкость и гигроскопическая влажность, напрямую зависят от соотношения гидрофобно-гидрофильных свойств ее агрегатов.

В связи с вышесказанным в ходе проведенного исследования был осуществлен анализ эффективности реагентной обработки нефтезагрязненной почвы с помощью неионогенного ПАВ полисорбата-80. Основными параметрами почвы, по которым оценивалось действие растворов ПАВ, служили такие важные в агрофизическом плане параметры почвы, как капиллярная влагоемкость и гигроскопическая влажность. С этими агрофизическими характеристиками тесно связана сельскохозяйственная ценность почв [23]. Целью работы являлось изучение изменения капиллярной влагоемкости и гигроскопической влажности образцов серой лесной почвы, загрязненных нефтью, дизельным топливом, моторным маслом, после промывки почвенных образцов растворами с различной концентрацией неионогенного ПАВ полисорбата-80.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектом исследования служила серая лесная почва, отобранная на территории Ботанического сада Иркутского государственного университета (г. Иркутск, Россия). Для нее характерно наличие серо-гумусового аккумулятивного горизонта, количественные характеристики которого приближены к нижним пределам показателей темно-гумусового горизонта. Данный горизонт имеет мощность 20–25 см и комковатую или комковато-пороховидную структуру. Реакция почвы являлась слабнокислой, в нижней части нейтральной¹.

В качестве модельных загрязнителей в экспериментах использовали минеральное моторное масло LUKOIL STANDARD 10W-40; нефть (плотность 0,85 г/см³) Марковского нефтегазоконденсатного месторождения (пос. Верхнемарково, Иркутская область, Россия) и дизельное топливо (летний сорт, ГОСТ 305-2013²). Промывку загрязненной почвы проводили растворами неионогенного ПАВ полисорбата-80 (другое название – полиоксиэтилен (20) сорбитан моноолеат) (АО «Вектон», Россия).

В экспериментальные образцы серой лесной почвы приливали нефть / дизельное топливо / моторное масло в концентрациях 50, 150 и 300 мл/кг, тщательно перемешивали. Пробы загрязненной почвы навеской по 100 г в 3 повторностях распределяли в пластиковые контейнеры объемом 250 мл, где они находились в течение суток до полного впитывания нефтепродуктов в почву. После этого почву пересыпали в колбы емкостью 500 мл и приливали по 400 мл воды и 100 мл промывочного водного раствора полисорбата-80 в концентрациях 1, 5 и 10 г/л. Колбы выдерживали в течение часа на лабораторном шейкере BIOSAN OS-20 (Biosan, Латвия) при скорости перемешивания 60 об/мин и температуре 20 °С.

После такой обработки почвенные образцы отделяли от промывочного раствора путем фильтрования через бумажные фильтры (синяя лента), подсушивали при комнатной температуре в течение суток.

Затем оценивали капиллярную влагоемкость (в процентах) методом определения скорости капиллярного подъема влаги и капиллярной влагоемкости почв, а также гигроскопическую влажность термостатно-весовым методом³. Оценку показателя капиллярной влагоемкости проводили по градации Н.А. Качинского, согласно которой капиллярная влагоемкость 40–50% считается наилучшей, 30–40% – хорошей, 25–30% – удовлетворительной, менее 25% – неудовлетворительной [24].

В качестве контроля использовали:

- 1) незагрязненные образцы почвы, промытые полисорбатом-80 в соответствии с описанными выше манипуляциями;
- 2) незагрязненные образцы почвы, промытые дистиллированной водой в соответствии с описанными выше манипуляциями.

Фитотоксичность испытуемых почвенных образцов оценивали аппликатным способом⁴. В чашки Петри

¹ Воробьева Г.А. Почвы Иркутской области: вопросы классификации, номенклатуры и корреляции: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2009. 149 с. EDN: QLARNX.

² ГОСТ 305-2013. Топливо дизельное. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. 15 с.

³ Bandyopadhyay K.K., Aggarwal P., Chakraborty D., Pradhan S., Garg R.N., Singh R. Practical manual on measurement of soil physical properties. New Delhi: Division of Agricultural Physics, Indian Agricultural Research Institute, 2012. 62 p.

⁴ Терехова В.А., Гершкович Д.М., Гладкова М.М., Ипатов В.И., Исакова Е.Ф., Николаева О.В. [и др.]. Биотестирование в экологическом контроле: учеб. пособие / под ред. В.А. Тереховой. М.: ГЕОС, 2017. 70 с.

(3 чашки Петри для контроля и 3 – для тестируемого образца) вносили предварительно увлажненную до 60% от полной влагоемкости почву слоем высотой 1 см. В качестве контроля выбирали незагрязненную почву с аналогичным гранулометрическим составом и содержанием органического вещества. Во все чашки вносили по 15 семян кресс-салата *Lepidium sativum*. Чашки Петри закрывали крышками и размещали в термостат при 20 °С. В течение опыта поддерживали влажность субстрата на одном и том же уровне, осуществляя регулярное взвешивание чашек и добавление воды с целью поддержания постоянного уровня влажности почвы. На 7-й день подсчитывали длину корней проростков в контрольных и опытных пробах. На основании этого параметра рассчитывали эффект торможения E_T по формуле:

$$E_T = \frac{L_K - L_{оп}}{L_K} \times 100\%,$$

где E_T – эффект торможения, %; $L_{оп}$ – средняя длина корней в опыте, мм; L_K – средняя длина корней в контроле, мм. Показателем токсического воздействия тестируемой почвенной пробы являлось уменьшение длины корней проростков по сравнению с контрольным вариантом (незагрязненная почва).

Все эксперименты проводили не менее чем в 3 независимых опытах с 3 параллельными измерениями. Для статистической обработки полученных данных применяли пакет программ Microsoft Excel. В работе приведены значения среднего арифметического и стандартное отклонение среднего арифметического (средняя квадратичная ошибка). Достоверность различия результатов определяли с помощью критерия Стьюдента. Выводы сделаны с вероятностью безошибочного прогноза $P \geq 0,95$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Капиллярная влагоемкость. Показатель капиллярной влагоемкости незагрязненной серой лесной почвы, исследуемой в данной работе, составлял от $62,1 \pm 0,9$ до $70,2 \pm 0,7\%$. Согласно классификации Качинского [24], это соответствовало наилучшей капиллярной влагоемкости. Загрязнение почвенных образцов исследуемыми нефтепродуктами (моторное масло, нефть, дизельное топливо) в концентрациях 50, 150 и 300 мл/кг приводило к их неудовлетворительной капиллярной влагоемкости. При этом в условиях наших экспериментов действие моторного масла на почву было более выраженным, чем влияние нефти в аналогичных концентрациях, еще менее сильное действие оказывало дизельное топливо. Так, например, капиллярная влагоемкость почвы в присутствии 50 мл/кг дизельного топлива снижалась с $62,1 \pm 0,9$ лишь до $42,6 \pm 0,1\%$, нефти в аналогичной концентрации – с $62,1 \pm 0,9$ до $22,6 \pm 1,0\%$ (то есть вдвое больше, чем при дизельном топливе), а в опытах с моторным маслом – еще более значительно: с $70,2 \pm 0,7$ до $16,7 \pm 0,6\%$. Такое соотношение исследуемых нефтепродуктов по их действию на капиллярную влагоемкость почвы сохранялось и при более высоком уровне нефтяного загрязнений – 150 и 300 мл/кг. Например, при внесении в почву 300 мл/кг дизельного топлива исследуемый агрофизический параметр уменьшался с $62,1 \pm 0,9$ до $25,7 \pm 0,2\%$, нефти – с $62,1 \pm 0,9$ до $12,5 \pm 2,3\%$, а моторного масла – с $70,2 \pm 0,7$ до $6,0 \pm 0,3\%$ (рис. 1).

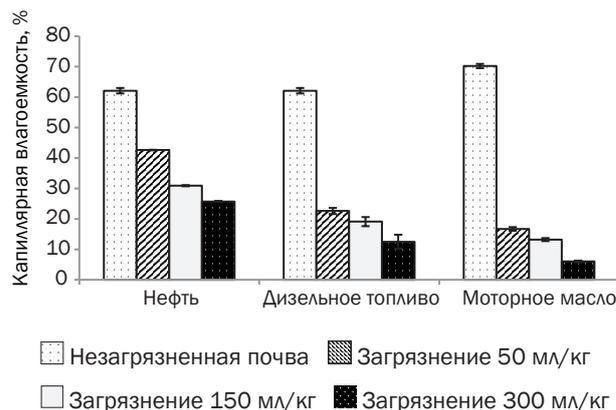


Рис. 1. Влияние дизельного топлива, нефти и моторного масла в концентрациях 50, 150 и 300 мл/кг на капиллярную влагоемкость серой лесной почвы (время от момента загрязнения – 1 сутки)

Fig. 1. Effect of diesel fuel, petroleum and motor oil in concentrations of 50, 150 and 300 ml/kg on the capillary moisture capacity of gray forest soil (time from the moment of contamination – 1 day)

Промывка полисорбатом-80 образцов почвы, загрязненной испытуемыми нефтепродуктами (нефтью, дизельным топливом, моторным маслом) вызывала повышение их капиллярной влагоемкости по сравнению с загрязненными почвенными образцами, однако она оставалась ниже исходных (незагрязненных) почв. Так, после применения промывочного раствора, содержащего 1 г/л полисорбата-80, капиллярная влагоемкость почвенного образца, загрязненного нефтью в концентрации 50 мл/кг, составила $37,5 \pm 0,2\%$, при 5 г/л – $50,2 \pm 0,1\%$, а при использовании раствора с концентрацией полисорбата-80 10 г/л – $48,0 \pm 0,1\%$ (рис. 2, а). Указанные значения оставались ниже показателей проб, в которых почва не подвергалась нефтяному загрязнению. Другими словами, промывка полисорбатом-80 не приводила к восстановлению исследуемого агрофизического показателя почвы до исходных параметров. Тем не менее значения капиллярной влагоемкости при использовании ПАВ повышались с уровня «неудовлетворительная» до «хорошая» или «наилучшая». Данный факт свидетельствует о принципиальной возможности и перспективности примененной реагентной обработки детергентами нефтезагрязненной почвы. При этом наилучший эффект был получен при использовании 5 г/л полисорбата-80 (см. рис. 2, а). Повышение его концентрации до 10 г/л не добавляло эффективности процессу, однако увеличивало расход реагента в 2 раза, что нерационально с экономической точки зрения.

Схожая тенденция была отмечена и при уровне нефтяного загрязнения 150 мл/кг (рис. 2, б). Промывка почвенных образцов, содержащих 150 мл/кг нефти, приводила к возрастанию их капиллярной влагоемкости с неудовлетворительной ($19,1 \pm 1,5\%$) до удовлетворительной ($25,9 \pm 0,1\%$) при 1 г/л полисорбата-80 и до хорошей при 5 и 10 г/л полисорбата-80 (до $41,9 \pm 0,6$ и $40,1 \pm 0,1\%$ соответственно).

При самом высоком из испытанных уровне загрязнения нефтью (300 мл/кг) добиться восстановления исследуемого агрофизического параметра до уровня

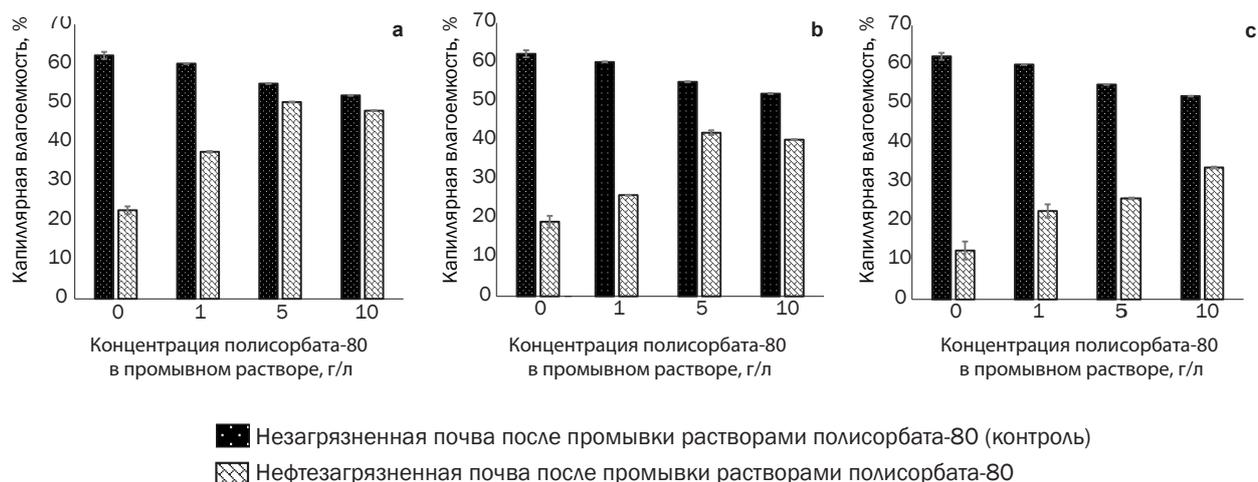


Рис. 2. Капиллярная влагоемкость серой лесной почвы, загрязненной нефтью в концентрациях 50 мл/кг (а), 150 мл/кг (б) и 300 мл/кг (с), после промывки полисорбатом-80

Fig. 2. Capillary water capacity of oil-contaminated grey forest soil in concentrations of 50 ml/kg (a), 150 ml/kg (b), 300 ml/kg (c) after washing with polysorbate 80

«хороший» удавалось лишь в ходе применения 10 г/л полисорбата-80. В этом случае значение капиллярной влагоемкости почвы после промывки раствором ПАВ возрастало с $12,5 \pm 2,3$ до $33,7 \pm 0,2\%$. Данное значение соответствует нижней границе уровня «хорошая влагоемкость» в градации Качинского). После использования промывных растворов, содержащих 1 г/л полисорбата-80, капиллярная влагоемкость почвы составляла $22,6 \pm 1,7\%$ (то есть оставалась неудовлетворительной), а при использовании растворов с концентрацией полисорбата-80 5 г/л – $25,8 \pm 0,2\%$ (нижняя граница уровня «удовлетворительная влагоемкость» в градации Качинского) (рис. 2, с).

Таким образом, при уровне нефтяного загрязнения до 150 мл/кг может быть перспективна реагентная обработка почвы промывными растворами с содержанием полисорбата-80 5 г/л (время обработки – 1 ч, соотношение в системе «почва – промывной раствор –

вода» составляет 1:1:4 (по массе). При рекультивации почв, загрязненных нефтью в концентрации 300 мл/кг, рекомендуется увеличение концентрации ПАВ в промывных растворах до 10 г/л.

Аналогичные эксперименты были проведены при загрязнении почвы дизельным топливом. Загрязнение серой лесной почвы дизельным топливом в концентрации 50 мл/кг приводило к снижению ее капиллярной влагоемкости с $62,1 \pm 0,9\%$ (незагрязненная почва) до $42,6 \pm 0,1\%$, при 150 мл/кг нефтепродукта – до $30,9 \pm 0,2\%$, а при 300 мл/кг – до $25,7 \pm 0,2\%$ (рис. 3). Согласно градации Качинского, эти значения соответствуют наилучшей, хорошей и удовлетворительной капиллярной влагоемкости. В результате промывки почвенных образцов, загрязненных дизельным топливом в концентрации 50 мл/кг, растворами, содержащими 5 и 10 г/л полисорбата-80, их капиллярная влагоемкость повышалась с $42,6 \pm 0,1$ до $53,7 \pm 0,3$ и $50,0 \pm 0,1\%$ соответственно.

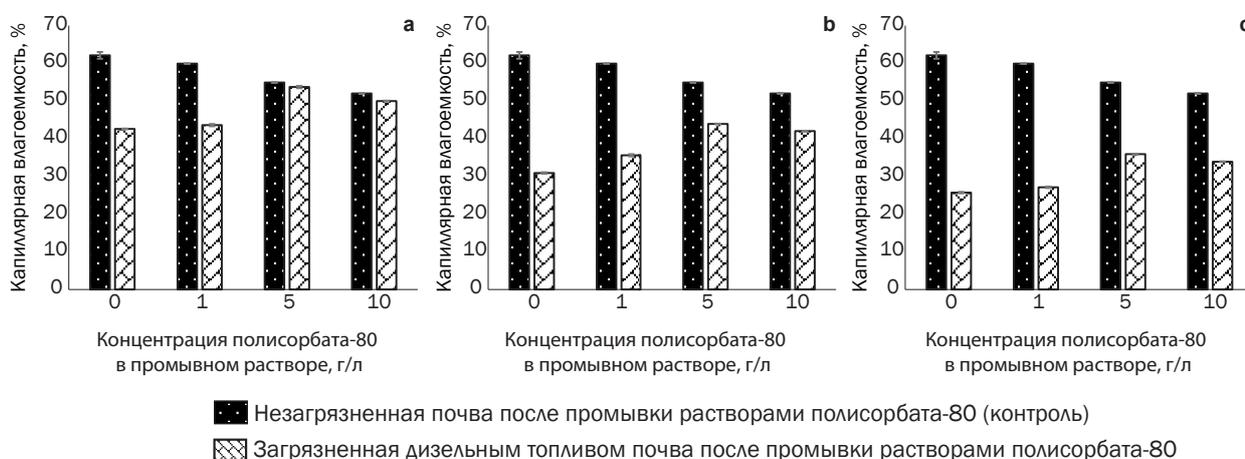


Рис. 3. Капиллярная влагоемкость серой лесной почвы, загрязненной дизельным топливом в концентрациях 50 мл/кг (а), 150 мл/кг (б) и 300 мл/кг (с), после промывки полисорбатом-80

Fig. 3. Capillary water capacity (%) of gray forest soil contaminated with diesel fuel in concentrations of 50 ml/kg (a), 150 ml/kg (b), 300 ml/kg (c) after washing with polysorbate 80

В образцах почвы, обработанных 1 г/л ПАВ, значения капиллярной влагоемкости до ($42,6 \pm 0,1\%$) и после ($43,6 \pm 0,3\%$) промывки были сопоставимы (см. рис. 3, а).

При уровне загрязнения дизельным топливом 150 мл/кг капиллярная влагоемкость почвенных проб ($30,9 \pm 0,2\%$) в результате обработки полисорбатом-80 в концентрации 1 г/л повышалась до $35,6 \pm 0,3\%$, при 5 г/л – $43,9 \pm 0,1\%$, при 10 г/л – $42,0 \pm 0,1\%$ (см. рис. 3, б). Ту же тенденцию наблюдали и при повышении степени загрязнения почвы дизельным топливом до 300 мл/кг (см. рис. 3, в). В этом случае капиллярная влагоемкость образцов после промывки растворами полисорбата-80 повышалась с $25,7 \pm 0,2$ до $27,1 \pm 0,2\%$ (при 1 г/л полисорбата-80), до $35,9 \pm 0,1\%$ (при 5 г/л полисорбата-80) и до $33,9 \pm 0,1\%$ (при 10 г/л полисорбата-80).

Загрязнение моторным маслом во всех исследуемых концентрациях (50, 150 и 300 мл/кг) приводило к неудовлетворительной капиллярной влагоемкости почв. Так, в присутствии 50 мл/кг моторного масла показатель капиллярной влагоемкости снижался с $70,2 \pm 0,7$ до $16,7 \pm 0,6\%$, при 150 мл/кг – до $13,2 \pm 0,5\%$, при 300 мл/кг – до $6,0 \pm 0,3\%$ (рис. 4). В результате промывки почвы, содержащей 50 мл/кг моторного масла, полисорбатом-80 показатель капиллярной влагоемкости повышался: после применения промывного раствора, содержащего 1 г/л полисорбата-80, капиллярная влагоемкость почвенного образца составила $31,6 \pm 0,4\%$, при использовании раствора с концентрацией полисорбата-80 5 г/л – $44,3 \pm 0,2\%$, с концентрацией 10 г/л – $52,3 \pm 0,1\%$ (см. рис. 4, а). Указанные значения оставались ниже показателей проб, в которых почва не подвергалась загрязнению моторным маслом. Таким образом, промывка полисорбатом-80 не приводила к восстановлению исследуемого агрофизического показателя почвы до исходных параметров. Тем не менее значения капиллярной влагоемкости при использовании ПАВ повышались с уровня «неудовлетворительная» до «хорошая» или «наилучшая». Это свидетельствует о принципиальной возможности применения реагентной обработки почвы, загрязненной моторным маслом, исследуемым детергентом. При этом наилучший эффект был получен при использовании 10 г/л полисорбата-80.

Схожая тенденция была отмечена и при уровне загрязнения моторным маслом 150 мл/кг (см. рис. 4, б). Промывка почвенных образцов, содержащих 150 мл/кг моторного масла, раствором с содержанием 1 г/л полисорбата-80 приводила к возрастанию их капиллярной влагоемкости с $13,2 \pm 0,5$ до $19,4 \pm 0,2\%$, однако оба этих значения соответствуют неудовлетворительному уровню испытуемого показателя. Более высокие концентрации ПАВ повышали уровень капиллярной влагоемкости с неудовлетворительного (с $13,2 \pm 0,5\%$) до хорошего: $34,2 \pm 0,3$ и $36,1 \pm 0,1\%$ при 5 и 10 г/л полисорбата-80 соответственно.

При самом высоком из испытанных уровне нефтяного загрязнения (300 мл/кг) добиться восстановления исследуемого агрофизического параметра до уровня «удовлетворительный» удавалось лишь в ходе применения 10 г/л полисорбата-80. В этом случае значение капиллярной влагоемкости почвы после промывки раствором ПАВ возрастало с $6,0 \pm 0,3$ до $26,5 \pm 0,2\%$. Данное значение соответствует нижней границе уровня «удовлетворительная влагоемкость» в градации Качинского. После использования промывных растворов, содержащих 1 г/л полисорбата-80, капиллярная влагоемкость почвы составляла $12,0 \pm 0,9\%$ (то есть оставалась неудовлетворительной), а при использовании растворов с концентрацией полисорбата-80 5 г/л – $21,3 \pm 0,2\%$ (нижняя граница уровня «неудовлетворительная влагоемкость» в градации Качинского) (см. рис. 4, с).

Следует отметить, что для того, чтобы исключить возможное влияние самого ПАВ на почву, в качестве контрольного варианта также рассматривали незагрязненные нефтепродуктами образцы исходной почвы, промытые растворами на основе полисорбата-80. Промывка незагрязненных почвенных образцов промывными растворами практически не меняла испытуемый параметр при содержании полисорбата-80 5 и 10 г/л (уменьшение в 1,1–1,2 раза, но при этом оно не являлось статистически достоверным). Например, при обработке почвенных образцов промывными растворами с содержанием полисорбата-80 1, 5 и 10 г/л испытуемый параметр составлял $68,0 \pm 0,2$, $62,9 \pm 0,1$ и $60,0 \pm 0,1\%$ соответственно, в то время как для незагряз-

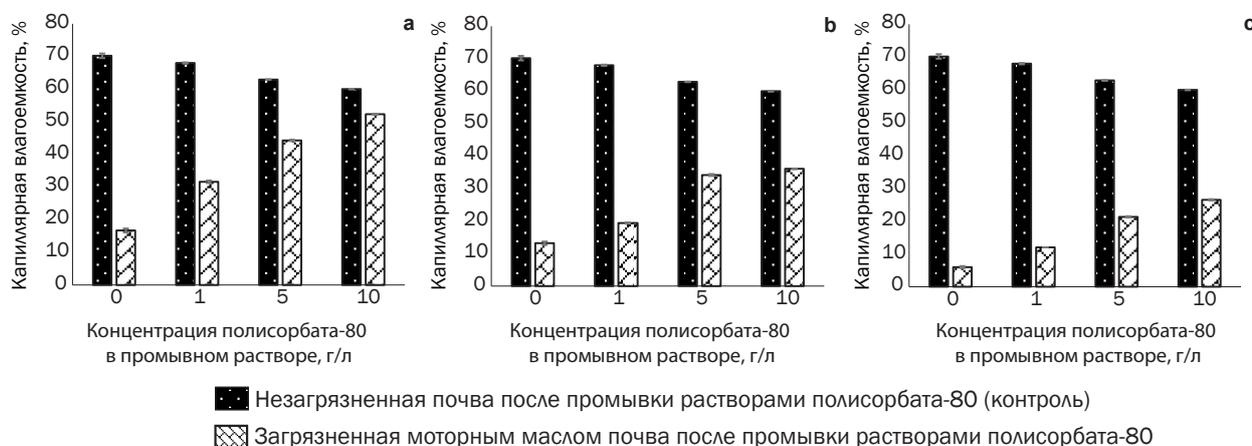


Рис. 4. Капиллярная влагоемкость серой лесной почвы, загрязненной моторным маслом в концентрациях 50 мл/кг (а), 150 мл/кг (б) и 300 мл/кг (в), после промывки полисорбатом-80

Fig. 4. Capillary water capacity of gray forest soil contaminated with motor oil in concentrations of 50 ml/kg (а), 150 ml/kg (б), 300 ml/kg (в) after washing with polysorbate 80

ненной почвы без обработки ПАВ он равнялся $70,2 \pm 0,7\%$ (по градации Качинского капиллярная влагоемкость почвы в диапазоне от 40% и выше считается наилучшей).

Гигроскопическая влажность. Вода особенно прочно удерживается в наиболее мелких порах и трещинах и испытывает со стороны поверхности твердой компоненты «связывающее» влияние разной природы. Адсорбционная вода как одна из разновидностей связанной воды образуется за счет адсорбционного «притяжения» молекул воды к активным адсорбционным центрам поверхности минерала. Она неоднородна и, в свою очередь, подразделяется на воду островной и полислойной адсорбции, которые различаются силой молекулярного взаимодействия. Общее количество воды полимолекулярной адсорбции характеризует такой почвенный параметр, как гигроскопическая влажность.

При оценке гигроскопической влажности наблюдали несколько иное соотношение испытуемых нефтепродуктов по степени их действия на этот параметр, нежели на капиллярную влагоемкость. В этом случае моторное масло оказывало меньший эффект, чем дизельное топливо и нефть (рис. 5).

После промывки образцов почвы, загрязненных испытуемыми нефтепродуктами (нефтью, дизельным топливом, моторным маслом), растворами полисорбата-80 происходило повышение их гигроскопической влажности. При этом при уровне нефтезагрязнений 50 мл/кг в условиях наших экспериментов промывкой растворами ПАВ удавалось достичь уровня гигроскопической влажности, соответствующего уровню влажности исходной (незагрязненной) почвы. При более высокой степени загрязнения (150 и 300 мл/кг) полного восстановления гигроскопической влажности не достигали, однако при промывке растворами, содержащими 10 г/л полисорбата-80, значения этого агрофизического параметра были очень близки к исходным. В качестве примера можно рассмотреть более подробно данные, представленные на рис. 6. Показатель гигроскопической влажности контрольного образца серой лесной почвы был равен 35,4%. После добавления в исходный образец почвы моторного масла в концентрации 50 мл/кг показатель становился равным 32,5%. После промывки полисорбатом-80 (1, 5 и 10 г/л) анализируемый показатель составлял 32,9, 34,8 и 35,2% соответственно (см. рис. 6, а).

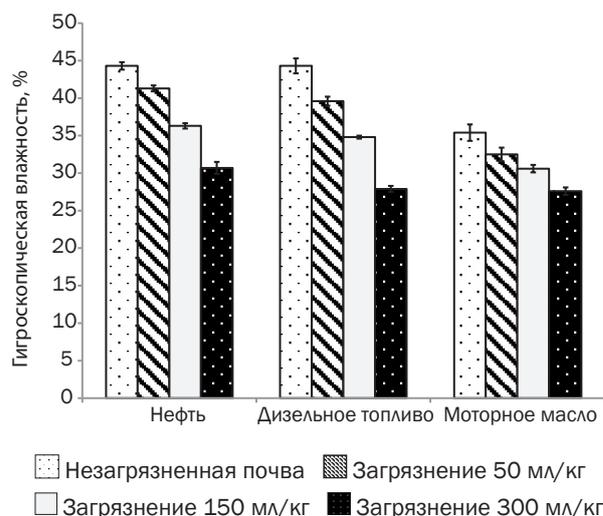


Рис. 5. Влияние дизельного топлива, нефти и моторного масла в концентрациях 50, 150 и 300 мл/кг на гигроскопическую влажность серой лесной почвы (время от момента загрязнения – 1 сутки)

Fig. 5. Effect of diesel fuel, petroleum and motor oil in concentrations of 50, 150 and 300 ml/kg on the hygroscopic moisture of gray forest soil (time from the moment of contamination – 1 day)

После приливания моторного масла (150 мл/кг) в исходный образец почвы показатель гигроскопической влажности составлял 30,6%. При промывке полисорбатом-80 (1, 5 и 10 г/л) данный показатель повысился и стал равен 31, 33,7 и 34,2% соответственно (см. рис. 6, б).

При добавлении моторного масла (300 мл/кг) в исходный образец почвы показатель гигроскопической влажности составлял 27,6%. Промывка полисорбатом-80 (1, 5 и 10 г/л) вызвала увеличение данного показателя до 28,2, 30,4 и 32,6% соответственно (см. рис. 6, с).

В аналогичных экспериментах с дизельным топливом (рис. 7) и нефтью (рис. 8) была получена тенденция, схожая с результатами экспериментов с моторным маслом (см. рис. 6).

Похожие результаты получены и другими авторами. Под действием нефти и нефтепродуктов почва приобретает более гидрофобные свойства. При увеличении количества нефти и нефтепродуктов в почве ее гидро-

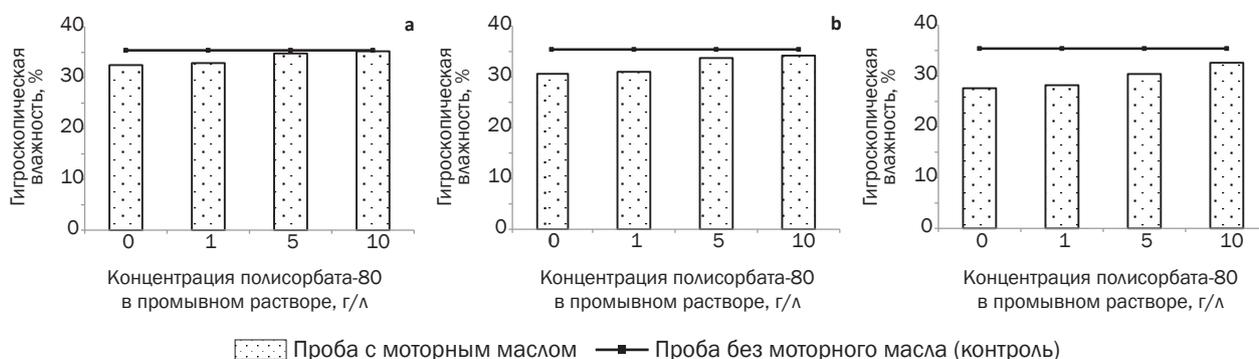


Рис. 6. Гигроскопическая влажность серой лесной почвы, загрязненной моторным маслом в концентрациях 50 мл/кг (а), 150 мл/кг (б), 300 мл/кг (с), после промывки полисорбатом-80

Fig. 6. Hygroscopic moisture content of gray forest soil contaminated with motor oil in concentrations of 50 ml/kg (а), 150 ml/kg (б), 300 ml/kg (с) after washing with polysorbate 80

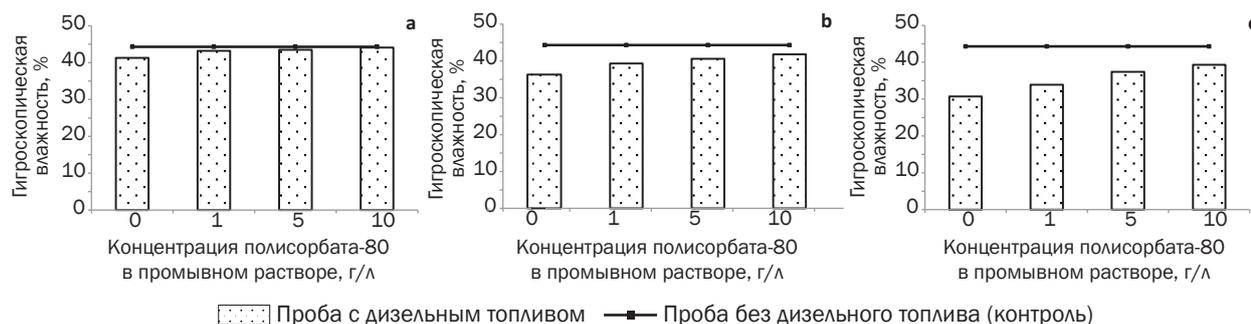


Рис. 7. Гигроскопическая влажность серой лесной почвы, загрязненной дизельным топливом в концентрациях 50 мл/кг (а), 150 мл/кг (b), 300 мл/кг (с), после промывки полисорбатом-80

Fig. 7. Hygroscopic moisture content of grey forest soil contaminated with diesel fuel in concentrations of 50 ml/kg (a), 150 ml/kg (b), 300 ml/kg (c) after washing with polysorbate 80

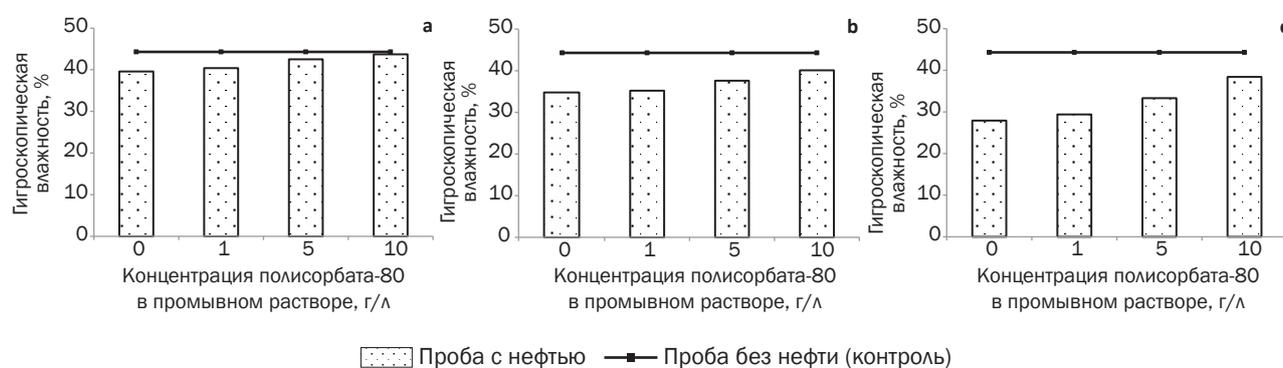


Рис. 8. Гигроскопическая влажность серой лесной почвы, загрязненной нефтью в концентрациях 50 мл/кг (а), 150 мл/кг (b), 300 мл/кг (с), после промывки полисорбатом-80

Fig. 8. Hygroscopic moisture content of gray forest soil contaminated with oil in concentrations of 50 ml/kg (a), 150 ml/kg (b), 300 ml/kg (c) after washing with polysorbate 80

фобность возрастала. Это снижало способность почвы впитывать влагу и проводить ее по почвенным капиллярам [25, 26].

После промывки почвы частично восстанавливали исходные характеристики [27–29]. ПАВ повышает смачиваемость почвы [30], поскольку гидрофобный хвост смачивающего агента химически связывается с гидрофобной поверхностью почвенных частиц, в то время как гидрофильная головка притягивает молекулы воды, тем самым позволяя им проникать в почву и таким образом увеличивая инфильтрацию [31].

В большинстве работ, описывающих промывку нефтезагрязненных почв при помощи растворов ПАВ, продемонстрирована количественная оценка остаточных или удаленных нефтепродуктов. В то же время реальная картина нефтяного загрязнения (как исходного, так и остаточного после ремедиационных мероприятий) иногда искажается вследствие погрешностей химического анализа, которые могут быть связаны со сложностью почвенной системы. Ее обуславливают разные физико-химический (гранулометрический, минеральный, химический) и биологический (видовой, популяционный) составы [32].

Учитывая все вышеперечисленное, на наш взгляд, для адекватной оценки эффективности реагентной обработки нефтезагрязненных почв необходимо опираться на результаты не только химического анализа, но и других

методов. Именно поэтому в данной работе нами были оценены агрофизические параметры почвы – капиллярная влагоемкость и гигроскопическая влажность. Они являются важнейшими характеристиками почвы, определяющими ее сельскохозяйственную ценность [23]. И именно они в первую очередь подвержены изменениям при действии таких гидрофобных загрязнителей, как нефть и ее производные. В связи с этим изменение этих параметров будет являться хорошим откликом на нефтяное загрязнение почвы и его удаление при помощи ПАВ, что и продемонстрировано в данной работе.

Фитотоксичность. Эффективность промывки нефтезагрязненной почвы растворами полисорбата-80 оценивали также по изменению фитотоксичности испытуемых почвенных образцов. Исследуемым параметром служил эффект торможения (в процентах) роста корней проростков кресс-салата *Lepidium sativum*.

Обработка почвенных проб, содержащих дизельное топливо (рис. 9), нефть (рис. 10) и машинное масло (рис. 11), растворами ПАВ приводила к незначительному снижению их токсичности. При этом полной детоксикации в условиях наших экспериментов не наблюдалось. Наибольший эффект оказывала промывка нефтезагрязненных почв растворами полисорбата-80 в концентрации 10 г/л, что соотносится с данными по капиллярной влагоемкости и гигроскопической влаж-

ности. Например, в почве, загрязненной дизельным топливом в концентрации 50 мл/кг, эффект торможения роста корней тест-растений (по сравнению с ростом в незагрязненной почве) составил $53,3 \pm 1,4\%$. В результате обработки такого почвенного образца раствором на основе 10 г/л полисорбата-80 эффект торможения снизился до $39,3 \pm 0,8\%$ (см. рис. 9). Таким образом, детоксикация оказалась незначительной и составила около 15% (достоверно при $P \geq 0,95$). Схожую тенденцию наблюдали при работе с почвами, загрязненными нефтью (см. рис. 10) и машинным маслом (см. рис. 11).

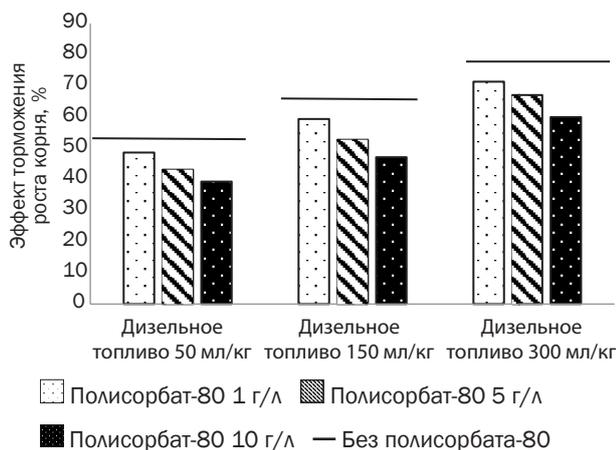


Рис. 9. Эффект торможения роста корней проростков семян кресс-салата *Lepidium sativum* в пробах серой лесной почвы, загрязненной дизельным топливом в концентрациях 50, 150 и 300 мл/кг, после промывки полисорбатом-80

Fig. 9. Inhibition effect of root growth of *Lepidium sativum* seedlings in grey forest soil samples contaminated with diesel fuel at concentrations of 50, 150 and 300 ml/kg after washing with polysorbate 80

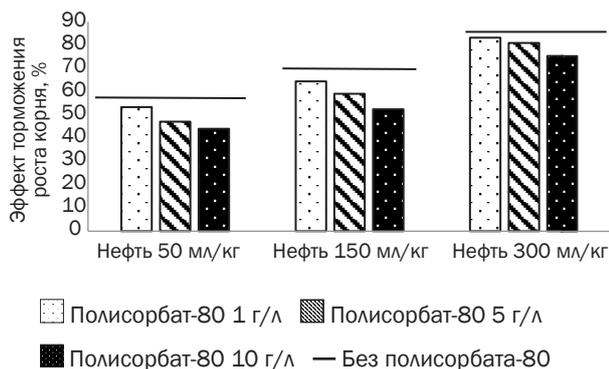


Рис. 10. Эффект торможения роста корней проростков семян кресс-салата *Lepidium sativum* в пробах серой лесной почвы, загрязненной нефтью в концентрациях 50, 150 и 300 мл/кг, после промывки полисорбатом-80

Fig. 10. Inhibition effect of root growth of *Lepidium sativum* seedlings in samples of grey forest soil contaminated with petroleum at concentrations of 50, 150 and 300 ml/kg after washing with polysorbate 80

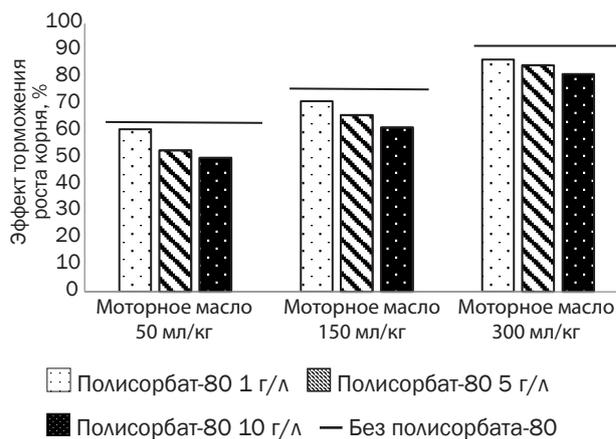


Рис. 11. Эффект торможения роста корней проростков семян кресс-салата *Lepidium sativum* в пробах серой лесной почвы, загрязненной моторным маслом в концентрациях 50, 150 и 300 мл/кг, после промывки полисорбатом-80

Fig. 11. Inhibition effect of root growth of *Lepidium sativum* seedlings in samples of grey forest soil contaminated with motor oil at concentrations of 50, 150 and 300 ml/kg after washing with polysorbate 80

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показатели капиллярной влагоемкости и гигроскопической влажности являются важнейшими почвенными характеристиками, отражающими степень нефтяного загрязнения почвы. Эксперименты показали, что после добавления в почву моторного масла, нефти и дизельного топлива в концентрациях 50, 150 и 300 мл/кг показатели капиллярной влагоемкости и гигроскопической влажности значительно снижались. При этом степень воздействия изученных нефтепродуктов на капиллярную влагоемкость почвы повышалась в ряду дизельное топливо < нефть < моторное масло. Действие указанных гидрофобных загрязнителей на гигроскопическую влажность характеризовалось несколько иным рядом: моторное масло < дизельное топливо < нефть.

Экспериментально продемонстрировано, что указанные почвенные характеристики также позволяют оценивать эффективность удаления нефтяного загрязнения в ходе реагентной промывки загрязненных почвенных образцов растворами ПАВ. В частности, с использованием этих агрофизических характеристик изучено влияние промывки почв, загрязненных тремя нефтепродуктами (дизельное топливо, моторное масло и нефть), растворами неионогенного ПАВ полисорбата-80. Для проведения очистки было использовано соотношение почвы, промывного раствора и воды 1:1:4 (по массе), а время обработки составило 60 мин. Эксперименты показали, что после промывки загрязненных почвенных образцов полисорбатом-80 изученные агрофизические параметры частично восстанавливались, однако оставались ниже, чем у исходных образцов почвы. Схожая тенденция выявлена и при оценке фитотоксичности исследуемых почвенных проб: после промывки нефтезагрязненных почвенных образцов растворами полисорбата-80 их фитотоксичность снижалась примерно на 15%.

При всем вышесказанном при уровне загрязнения почвы нефтепродуктами до 150 мл/кг наилучшими промывными свойствами обладали растворы, содер-

жащие 5 г/л полисорбата-80, а при уровне загрязнения 300 мл/кг рекомендуется повышать концентрацию исследуемого ПАВ до 10 г/л.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Sakhaei Z., Riazi M. *In-situ* petroleum hydrocarbons contaminated soils remediation by polymer enhanced surfactant flushing: mechanistic investigation // *Process Safety and Environmental Protection*. 2022. Vol. 161. P. 758–770. DOI: 10.1016/j.psep.2022.03.086.
2. Lovindeer R., Mynott S., Porobic J., Fulton E.A., Hook S.E., Pethybridge H., et al. Ecosystem-level impacts of oil spills: a review of available data with confidence metrics for application to ecosystem models // *Environmental Modeling & Assessment*. 2023. Vol. 28. P. 939–960. DOI: 10.1007/s10666-023-09905-1.
3. Ifediora N.H., Oti V.O., Adaji A. Changes in physico-chemical and heavy metal properties of soil treated with spent engine oil and poultry manure after 12 weeks of growing *Phyllanthus urinaria* // *BIU Journal of Basic and Applied Sciences*. 2023. Vol. 8, no. 1. P. 36–48.
4. Koshlaf E., Ball A.S. Soil bioremediation approaches for petroleum hydrocarbon polluted environments // *AIMS Microbiology*. 2017. Vol. 3, no. 1. P. 25–49. DOI: 10.3934/microbiol.2017.1.25.
5. Ogbonna D.N. Application of biological methods in the remediation of oil polluted environment in Nigeria // *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*. 2018. Vol. 17, no. 4. P. 1–10. DOI: 10.9734/JABB/2018/41036.
6. Abu-Khasan M.S., Makarov Y.I. Analysis of soil contamination with oil and petroleum products // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 937. P. 022046. DOI: 10.1088/1755-1315/937/2/022046.
7. Mekonnen B.A., Aragaw T.A., Genet M.B. Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil: a review on principles, degradation mechanisms, and advancements // *Frontiers in Environmental Science*. 2024. Vol. 12. P. 1354422. DOI: 10.3389/fenvs.2024.1354422.
8. Jabbar N.M., Alardhi S.M., Mohammed A.K., Salih I.K., Albayati T.M. Challenges in the implementation of bioremediation processes in petroleum-contaminated soils: a review // *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2022. Vol. 18. P. 100694. DOI: 10.1016/j.enmm.2022.100694.
9. Ossai I.Ch., Ahmed A., Hassan A., Hamid F.Sh. Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: a review // *Environmental Technology & Innovation*. 2020. Vol. 17. P. 100526. DOI: 10.1016/j.eti.2019.100526.
10. Weng M.-C., Lin C.-L., Lee C.-H. Effect of heat-treatment remediation on the mechanical behavior of oil-contaminated soil // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, no. 9. P. 3174. DOI: 10.3390/app10093174.
11. Mambwe M., Kalebaila K.K., Johnson T. Remediation technologies for oil contaminated soil // *Global Journal of Environmental Science and Management*. 2021. Vol. 7, no. 3. P. 419–438. DOI: 10.22034/gjesm.2021.3.07.
12. Топчий И.А., Стом Д.И., Доница К.Ю., Алферов С.В., Нечаева И.А., Купчинский А.Б. [и др.]. Использование поверхностно-активных веществ в биодеградации гидрофобных соединений: обзор // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2022. Т. 12. N 4. С. 521–537. DOI: 10.21285/2227-2925-2022-12-4-521-537. EDN: GCGFRC.
13. Tiwari M., Tripathy D.B. Soil contaminants and their removal through surfactant-enhanced soil remediation: a comprehensive review // *Sustainability*. 2023. Vol. 15, no. 17. P. 13161. DOI: 10.3390/su151713161.
14. Caetano G., de Matos Machado R., Neiva Correia M.J., Marrucho I.M. Remediation of soils contaminated with total petroleum hydrocarbons through soil washing with surfactant solutions // *Environmental Technology*. 2023. Vol. 45, no. 15. P. 2969–2982. DOI: 10.1080/09593330.2023.2198733.
15. Dos Santos A.V., Simonelli G., dos Santos, L.C.L. Review of the application of surfactants in microemulsion systems for remediation of petroleum contaminated soil and sediments // *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30. P. 32168–32183. DOI: 10.1007/s11356-023-25622-4.
16. Mustapha D.S., Bawa-Allah K.A. Differential toxicities of anionic and nonionic surfactants in fish // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27. P. 16754–16762. DOI: 10.1007/s11356-020-08212-6.
17. Nunes R.F., Teixeira A.C.S.C. An overview on surfactants as pollutants of concern: occurrence, impacts and persulfate-based remediation technologies // *Chemosphere*. 2022. Vol. 300. P. 134507. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134507.
18. Stom D.I., Dolgikh M.M., Titov I.N., Dambaeva G.V., Zhdanova G.O., Stom A.D., et al. Effect of cationic, anionic and non-ionic surfactants on soil oligochaetes *Eisenia fetida andrey* (Bouche, 1972) // *Теоретическая и прикладная экология*. 2024. N 3. С. 133–140. DOI: 10.25750/1995-4301-2024-3-133-140. EDN: KHZQEV.
19. Donina K.Yu., Saksonov M.N., Kupchinsky A.B., Cherkasov D.V., Stom D.I. The effect of surfactants on the release of ions from the shoots of *Elodea canadensis* // *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2817. P. 020045. DOI: 10.1063/5.0148419.
20. Крапивная М.В., Домрачева В.А., Стом Д.И. Влияние поверхностно-активных веществ (додецилсульфата натрия, цетилтриметиламмония бромида) на проницаемость клеточных мембран корнеплодов красной столовой свеклы *Beta vulgaris* L. // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2023. Т. 13. N 1. С. 50–56. DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-1-50-56. EDN: VCBMUZ.
21. Sutormin O.S., Kolosova E.M., Torgashina I.G., Kratasyuk V.A., Kudryasheva N.S., Kinstler J.S., et al. Toxicity of different types of surfactants via cellular and enzymatic assay systems // *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. Vol. 24, no. 1. P. 515. DOI: 10.3390/ijms24010515.
22. Yu B., Chiang P.-T. Effect of hydrophobic/hydrophilic groups of surfactants on wax deposition studied by model waxy oil system // *SPE International Conference on Oilfield Chemistry*. Woodlands, 2023. DOI: 10.2118/213821-MS.
23. Javed A., Ali E., Afzal Kh.B., Osman A., Riaz S. Soil fertility: factors affecting soil fertility, and biodiversity responsible for soil fertility // *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences*. 2022. Vol. 12. P. 21–33. DOI: 10.26502/ijpaes.202129.

24. Качинский Н.А. Физика почвы. М.: Высшая школа, 1965. 323 с. EDN: YWWBIL.

25. Hewelke E., Gozdowski D. Hydrophysical properties of sandy clay contaminated by petroleum hydrocarbon // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27. P. 9697–9706. DOI: 10.1007/s11356-020-07627-5.

26. Gordon G., Stavi I., Shavit U., Rosenzweig R. Oil spill effects on soil hydrophobicity and related properties in a hyper-arid region // *Geoderma*. 2018. Vol. 312. P. 114–120. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.10.008.

27. Bolan Sh., Padhye L.P., Mulligan C.N., Alonso E.R., Saint-Fort R., Jasemizad T., et al. Surfactant-enhanced mobilization of persistent organic pollutants: Potential for soil and sediment remediation and unintended consequences // *Journal of Hazardous Materials*. 2023. Vol. 443. Part A. P. 130189. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.130189.

28. Liu J.-W., Wei K.-H., Xu S.-W., Cui J., Ma J., Xiao X.-L., et al. Surfactant-enhanced remediation of oil-contaminated soil and groundwater: a review // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 756. P. 144142. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144142.

29. Srivastava V., Puri M., Srivastava T., Nidheesh P.V., Kumar M.S. Integrated soil washing and bioreactor systems for the treatment of hexachlorocyclohexane contaminated soil: a review on enhanced degradation mechanisms, and factors affecting soil washing and bioreactor performances // *Environmental Research*. 2022. Vol. 208. P. 112752. DOI: 10.1016/j.envres.2022.112752.

30. Lowe M.-A., McGrath G., Mathes F., Leopold M. Evaluation of surfactant effectiveness on water repellent soils using electrical resistivity tomography // *Agricultural Water Management*. 2017. Vol. 181. P. 56–65. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.11.013.

31. Ogunmokun F.A., Liu Zh., Wallach R. The influence of surfactant-application method on the effectiveness of water-repellent soil remediation // *Geoderma*. 2020. Vol. 362. P. 114081. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.114081.

32. Turov Y.P., Guznyaeva M.Y., Lazarev D.A., Petrova Yu Yu., Zhdanova G.O., Stom D.I. Study of sorption and removal of oil hydrocarbons in soil samples // *Eurasian Soil Science*. 2022. Vol. 55. P. 830–839. DOI: 10.1134/S1064229322060151.

REFERENCES

1. Sakhaei Z., Riazi M. *In-situ* petroleum hydrocarbons contaminated soils remediation by polymer enhanced surfactant flushing: mechanistic investigation. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022;161:758-770. DOI: 10.1016/j.psep.2022.03.086.

2. Lovindeer R., Mynott S., Porobic J., Fulton E.A., Hook S.E., Pethybridge H., et al. Ecosystem-level impacts of oil spills: a review of available data with confidence metrics for application to ecosystem models. *Environmental Modeling & Assessment*. 2023;28:939-960. DOI: 10.1007/s10666-023-09905-1.

3. Ifediora N.H., Oti V.O., Adaji A. Changes in physico-chemical and heavy metal properties of soil treated with spent engine oil and poultry manure after 12 weeks of growing *Phyllanthus urinaria*. *BIU Journal of Basic and Applied Sciences*. 2023;8(1):36-48.

4. Koshlaf E., Ball A.S. Soil bioremediation approaches for petroleum hydrocarbon polluted environments. *AIMS Microbiology*. 2017;3(1):25-49. DOI: 10.3934/microbiol.2017.1.25.

5. Ogbonna D.N. Application of biological methods in the remediation of oil polluted environment in Nigeria. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*. 2018;17(4):1-10. DOI: 10.9734/JABB/2018/41036.

6. Abu-Khasan M.S., Makarov Y.I. Analysis of soil contamination with oil and petroleum products. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;937:022046. DOI: 10.1088/1755-1315/937/2/022046.

7. Mekonnen B.A., Aragaw T.A., Genet M.B. Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil: a review on principles, degradation mechanisms, and advancements. *Frontiers in Environmental Science*. 2024;12:1354422. DOI: 10.3389/fenvs.2024.1354422.

8. Jabbar N.M., Alardhi S.M., Mohammed A.K., Salih I.K., Albayati T.M. Challenges in the implementation of bioremediation processes in petroleum-contaminated soils: a review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2022;18:100694. DOI: 10.1016/j.enmm.2022.100694.

9. Ossai I.Ch., Ahmed A., Hassan A., Hamid F.Sh. Remediation of soil and water contaminated with petroleum

hydrocarbon: a review. *Environmental Technology & Innovation*. 2020;17:100526. DOI: 10.1016/j.eti.2019.100526.

10. Weng M.-C., Lin C.-L., Lee C.-H. Effect of heat-treatment remediation on the mechanical behavior of oil-contaminated soil. *Applied Sciences*. 2020;10(9):3174. DOI: 10.3390/app10093174.

11. Mambwe M., Kalebaila K.K., Johnson T. Remediation technologies for oil contaminated soil. *Global Journal of Environmental Science and Management*. 2021;7(3):419-438. DOI: 10.22034/gjesm.2021.3.07.

12. Topchiy I.A., Stom D.I., Donina K.Yu., Alferov S.V., Nechaeva I.A., Kupchinsky A.B., et al. Use of surfactants in biodegradation of hydrophobic compounds: a review. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2022;12(4):521-537. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2022-12-4-521-537. EDN: GCGFRC.

13. Tiwari M., Tripathy D.B. Soil contaminants and their removal through surfactant-enhanced soil remediation: a comprehensive review. *Sustainability*. 2023;15(17):13161. DOI: 10.3390/su151713161.

14. Caetano G., de Matos Machado R., Neiva Correia M.J., Marrucho I.M. Remediation of soils contaminated with total petroleum hydrocarbons through soil washing with surfactant solutions. *Environmental Technology*. 2023;45(15):2969-2982. DOI: 10.1080/09593330.2023.2198733.

15. Dos Santos A.V., Simonelli G., dos Santos, L.C.L. Review of the application of surfactants in microemulsion systems for remediation of petroleum contaminated soil and sediments. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023;30:32168-32183. DOI: 10.1007/s11356-023-25622-4.

16. Mustapha D.S., Bawa-Allah K.A. Differential toxicities of anionic and nonionic surfactants in fish. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020;27:16754-16762. DOI: 10.1007/s11356-020-08212-6.

17. Nunes R.F., Teixeira A.C.S.C. An overview on surfactants as pollutants of concern: occurrence, impacts and persulfate-based remediation technologies. *Chemosphere*. 2022;300:134507. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134507.

- 18.** Stom D.I., Dolgikh M.M., Titov I.N., Dambaeva G.V., Zhdanova G.O., Stom A.D., et al. Effect of cationic, anionic and non-ionic surfactants on soil oligochaetes *Eisenia fetida andrey* (Bouche, 1972). *Theoretical and Applied Ecology*. 2024;3:133-140. (In Russian). DOI: 10.25750/1995-4301-2024-3-133-140. EDN: KHZQEV.
- 19.** Donina K.Yu., Saksonov M.N., Kupchinsky A.B., Cherkasov D.V., Stom D.I. The effect of surfactants on the release of ions from the shoots of *Elodea Canadensis*. *AIP Conference Proceedings*. 2023;2817:020045. DOI: 10.1063/5.0148419.
- 20.** Krapivnaya M.V., Domracheva V.A., Stom D.I. Effect of surfactants (sodium dodecyl sulfate, cetyltrimethylammonium bromide) on cell membrane permeability of red beet roots *Beta vulgaris* L. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2023;13(1):50-56. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-1-50-56. EDN: BCBMUZ.
- 21.** Sutormin O.S., Kolosova E.M., Torgashina I.G., Kratasyuk V.A., Kudryasheva N.S., Kinstler J.S., et al. Toxicity of different types of surfactants via cellular and enzymatic assay systems. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023;24(1):515. DOI: 10.3390/ijms24010515.
- 22.** Yu B., Chiang P.-T. Effect of hydrophobic/hydrophilic groups of surfactants on wax deposition studied by model waxy oil system. In: *SPE International Conference on Oilfield Chemistry*. Woodlands; 2023. DOI: 10.2118/213821-MS.
- 23.** Javed A., Ali E., Afzal Kh.B., Osman A., Riaz S. Soil fertility: factors affecting soil fertility, and biodiversity responsible for soil fertility. *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences*. 2022;12:21-33. DOI: 10.26502/ijpaes.202129.
- 24.** Kachinsky N.A. *Soil physics*. Moscow: Vysshaya shkola; 1965, 323 p. (In Russian). EDN: YWWBIL.
- 25.** Hewelke E., Gozdowski D. Hydrophysical properties of sandy clay contaminated by petroleum hydrocarbon. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020;27:9697-9706. DOI: 10.1007/s11356-020-07627-5.
- 26.** Gordon G., Stavi I., Shavit U., Rosenzweig R. Oil spill effects on soil hydrophobicity and related properties in a hyper-arid region. *Geoderma*. 2018;312:114-120. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.10.008.
- 27.** Bolan Sh., Padhye L.P., Mulligan C.N., Alonso E.R., Saint-Fort R., Jasemizad T., et al. Surfactant-enhanced mobilization of persistent organic pollutants: Potential for soil and sediment remediation and unintended consequences. *Journal of Hazardous Materials*. 2023;443:130189. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.130189.
- 28.** Liu J.-W., Wei K.-H., Xu S.-W., Cui J., Ma J., Xiao X.-L., et al. Surfactant-enhanced remediation of oil-contaminated soil and groundwater: a review. *Science of The Total Environment*. 2021;756:144142. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144142.
- 29.** Srivastava V., Puri M., Srivastava T., Nidheesh P.V., Kumar M.S. Integrated soil washing and bioreactor systems for the treatment of hexachlorocyclohexane contaminated soil: a review on enhanced degradation mechanisms, and factors affecting soil washing and bioreactor performances. *Environmental Research*. 2022;208:112752. DOI: 10.1016/j.envres.2022.112752.
- 30.** Lowe M.-A., McGrath G., Mathes F., Leopold M. Evaluation of surfactant effectiveness on water repellent soils using electrical resistivity tomography. *Agricultural Water Management*. 2017;181:56-65. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.11.013.
- 31.** Ogunmokun F.A., Liu Zh., Wallach R. The influence of surfactant-application method on the effectiveness of water-repellent soil remediation. *Geoderma*. 2020;362:114081. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.114081.
- 32.** Turov Y.P., Guznyaeva M.Y., Lazarev D.A., Petrova Yu Yu., Zhdanova G.O., Stom D.I. Study of sorption and removal of oil hydrocarbons in soil samples. *Eurasian Soil Science*. 2022;55:830-839. DOI: 10.1134/S1064229322060151.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рюмин Максим Борисович,

аспирант,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
maksim.ryumin@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-4762-4613>

Лопатовская Ольга Геннадьевна,

д.б.н., профессор, заведующий кафедрой,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
lopatovs@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5570-545X>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Maxim B. Ryumin,

Postgraduate Student,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
maksim.ryumin@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-4762-4613>

Olga G. Lopatovskaya,

Dr. Sci. (Biology), Professor,
Head of the Department,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
lopatovs@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5570-545X>

Стом Дэвард Иосифович,

д.б.н., профессор,
главный научный сотрудник,
Байкальский музей СО РАН,
664520, п. Листвянка, ул. Академическая, 1,
Российская Федерация,
профессор,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
профессор,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
ведущий научный сотрудник,
Сургутский государственный университет,
628412, г. Сургут, пр. Ленина, 1,
Российская Федерация,
✉ stomd@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9496-2961>

Чеснокова Александра Николаевна,

к.х.н., доцент,
доцент, заведующий лабораториями,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
chesnokova@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-0326-7224>

Сутормин Олег Сергеевич,

к.б.н., заведующий кафедрой,
Сургутский государственный университет,
628412, г. Сургут, пр. Ленина, 1,
Российская Федерация,
sutormin_os@surgu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9474-0568>

Купчинский Александр Борисович,

к.б.н., директор,
Байкальский музей СО РАН,
664520, п. Листвянка, ул. Академическая, 1,
Российская Федерация,
albor67@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0001-8884-8636>

Алферов Сергей Валерьевич,

к.х.н., доцент, заведующий лабораторией,
Тульский государственный университет,
300012, г. Тула, ул. Фридриха Энгельса, 157,
Российская Федерация,
s.v.alferov@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5217-7815>

Devard I. Stom,

Dr. Sci. (Biology), Professor,
Chief Researcher,
Baikal Museum SB RAS,
1, Academicheskaya St., Listvyanka, 664520,
Russian Federation,
Professor,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
Professor,
Irkutsk National Research Technical University
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
Leading Researcher,
Surgut State University,
1, Lenin Ave., Surgut, 628412,
Russian Federation,
✉ stomd@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9496-2961>

Alexandra N. Chesnokova,

Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor,
Associate Professor, Head of Laboratories,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
chesnokova@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-0326-7224>

Oleg S. Sutormin,

Cand. Sci. (Biology), Head of the Department,
Surgut State University,
1, Lenin Ave., Surgut, 628412,
Russian Federation,
sutormin_os@surgu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9474-0568>

Alexander B. Kupchinsky,

Cand. Sci. (Biology), Director,
Baikal Museum SB RAS,
1, Academicheskaya St., Listvyanka, 664520,
Russian Federation,
albor67@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0001-8884-8636>

Sergey V. Alferov,

Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor,
Head of the Laboratory,
Tula State University;
157, Friedrich Engels St., Tula, 300012,
Russian Federation,
s.v.alferov@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5217-7815>

Петрова Юлия Юрьевна,
к.х.н., доцент, директор Института
естественных и технических наук,
Сургутский государственный университет,
628412, г. Сургут, пр. Ленина, 1,
Российская Федерация,
petrova_juju@surgu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3702-2249>

Есимситова Зура Беркутовна,
к.б.н.,
доцент,
Казахский национальный
университет им. аль-Фараби,
050040, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71,
Республика Казахстан,
главный научный сотрудник,
Научный производственно-технический
центр «Жалын»,
050014, г. Алматы, ул. Павлодарская, 11,
Республика Казахстан,
zura1958@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4735-2033>

Федина Вероника Вячеславовна,
ассистент, младший научный сотрудник,
Тульский государственный университет,
300012, г. Тула, ул. Фридриха Энгельса, 157,
Российская Федерация,
agapovaweronica@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5831-123X>

Артеменко Юлия Владимировна,
аспирант,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
juliapixell@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0008-4228-778X>

Вклад авторов

М.Б. Рюмин – проведение исследования,
написание черновика рукописи.
О.Г. Лопатовская – научное руководство,
разработка методологии,
редактирование рукописи.
Д.И. Стом – научное руководство,
курирование данных.
А.Н. Чеснокова – разработка концепции,
написание черновика рукописи,
редактирование рукописи.
О.С. Сутормин – валидация результатов.
А.Б. Купчинский – формальный анализ,
предоставление ресурсов.
С.В. Алферов – получение финансирования;
административное руководство
исследовательским проектом.
Ю.Ю. Петрова – написание черновика рукописи,
редактирование рукописи.
З.Б. Есимситова – написание черновика
рукописи, редактирование рукописи.
В.В. Федина – проведение исследования.
Ю.В. Артеменко – проведение исследования.

Yulia Yu. Petrova,
Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor,
Director of the Institute of Natural
and Technical Sciences,
Surgut State University,
1, Lenin Ave., Surgut, 628412,
Russian Federation,
petrova_juju@surgu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3702-2249>

Zura B. Yessimsitova,
Cand. Sci. (Biology),
Associate Professor,
Al-Farabi Kazakh National University,
71, al-Farabi Ave., Almaty, 050040,
Republic of Kazakhstan,
Chief Researcher,
Scientific Production-Technical Center “Jalyn”,
11, Pavlodarskaya St., Almaty, 050014,
Republic of Kazakhstan,
zura1958@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4735-2033>

Veronika V. Fedina,
Assistant, Junior Researcher,
Tula State University;
157, Friedrich Engels St., Tula, 300012,
Russian Federation,
agapovaweronica@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5831-123X>

Yulia V. Artemenko,
Postgraduate Student,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
juliapixell@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0008-4228-778X>

Contribution of the authors

Maksim B. Ryumin – investigation,
writing – original draft.
Olga G. Lopatovskaya – supervision,
methodology, writing – editing.
Devard I. Stom – supervision, data curation.
Alexandra N. Chesnokova – conceptualization,
writing – original draft, writing – editing.
Oleg S. Sutormin – validation.
Aleksander B. Kupchinsky – formal analysis,
resources.
Sergey V. Alferov – funding acquisition,
project administration.
Yuliya Yu. Petrova – writing – original draft,
writing – editing.
Zura B. Yesimsitova – writing – original draft,
writing – editing.
Veronika V. Fedina V.V. – investigation.
Yuliya V. Artemenko – investigation.

Конфликт интересов

А.Н. Чеснокова является членом редакционной коллегии журнала «Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология» с 2018 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 13.08.2024.
Одобрена после рецензирования 20.01.2025.
Принята к публикации 28.02.2025.

Conflict of interest

Alexandra N. Chesnokova has been a member of the Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology Journal Editorial Board since 2018, but she was not involved in making decision about accepting the present article for publication. The article was subjected the Journal's review procedure. The authors did not report any other conflicts of interest.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 13.08.2024.
Approved after reviewing 20.01.2025.
Accepted for publication 28.02.2025.