

УДК 504.062.4

## Оценка эффективности биогеосорбентов на основе минеральных носителей для очистки нефтезагрязненной почвы

В. А. Мязин\*, Д. А. Шушков, Н. В. Фокина, А. А. Чапоргина,  
А. В. Канивец, А. В. Брянцев

\*Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия;  
e-mail: [v.myazin@ksc.ru](mailto:v.myazin@ksc.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4155-3416>

### Информация о статье

Поступила  
в редакцию  
09.11.2023;

принята к публикации  
12.01.2024

### Ключевые слова:

нефтяные углеводороды,  
загрязненные почвы,  
биогеосорбенты,  
биоремедиация,  
иммобилизованные  
бактерии

### Для цитирования

### Реферат

Методы очистки нефтезагрязненных территорий включают применение сорбентов, повышению эффективности которых способствует иммобилизация на их поверхности углеводородокисляющих микроорганизмов. Биогеосорбенты получены на основе минерального сырья (анальдим- и глауконитсодержащих пород и термоактивированного вермикулита) и углеводородокисляющих бактерий родов *Pseudomonas* и *Microbacterium*, выделенных из загрязненных почв Мурманской области. Численность иммобилизованных бактерий на исследуемых носителях остается высокой на протяжении 9 месяцев хранения, а бактериальная пленка на поверхности минеральных носителей сохраняется в течение 12 месяцев хранения в воздушно-сухом состоянии. При хранении биогеосорбентов не требуются создание специальных условий и дополнительная подготовка перед использованием. Минеральные носители оказывают стимулирующее влияние на высоту проростков и длину корней тест-растений. При внесении биогеосорбентов увеличивается численность бактерий, способных к микробиологической трансформации нефтепродуктов, и повышается степень очистки почвы от углеводородов нефти на начальном этапе (в течение первых 30 суток). Наиболее эффективным является внесение термоактивированного вермикулита и глауконитсодержащей породы с иммобилизованными углеводородокисляющими бактериями. Применение биогеосорбента на основе термоактивированного вермикулита позволяет сократить время очистки до 20–22 месяцев, а на основе глауконитсодержащей породы – до 17 месяцев (без очистки этот период составляет 29 месяцев).

Мязин В. А. и др. Оценка эффективности биогеосорбентов на основе минеральных носителей для очистки нефтезагрязненной почвы. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 1. С. 91–102. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-1-91-102>.

## Effectiveness of biogeosorbents based on mineral carriers for treatment oil-contaminated soil

Vladimir A. Myazin\*, Dmitry A. Shushkov, Nadezhda V. Fokina,  
Aleksandra A. Chaporgina, Anastasiya V. Kanivets, Aleksandr V. Bryantsev

\*Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Apatity, Russia;  
e-mail: [v.myazin@ksc.ru](mailto:v.myazin@ksc.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4155-3416>

### Article info

Received  
09.11.2023;

accepted  
12.01.2024

### Key words:

petroleum  
hydrocarbons,  
contaminated soils,  
biogeosorbents,  
biodegradation,  
immobilized bacteria

### For citation

### Abstract

Methods for cleaning oil-contaminated areas include the use of sorbents, the effectiveness of which is enhanced by the immobilization of hydrocarbon-oxidizing microorganisms on their surface. Biogeosorbents are obtained on the basis of mineral raw materials (analcime- and glauconite-containing rocks and thermally activated vermiculite) and hydrocarbon-oxidizing bacteria of the genera *Pseudomonas* and *Microbacterium* extracted from contaminated soils of the Murmansk region. The number of immobilized bacteria on the studied carriers remains high throughout 9 months of storage, and the bacterial film on the surface of mineral carriers persists for 12 months of storage in an air-dry state. When storing biogeosorbents, no special conditions or additional preparation are required before use. Mineral carriers have a stimulating effect on the height of seedlings and the length of roots of test plants. When biogeosorbents are added, the number of bacteria capable of microbiological transformation of petroleum products increases, and the degree of soil purification from petroleum hydrocarbons at the initial stage (during the first 30 days) increases. The most effective is the introduction of thermally activated vermiculite and glauconite-containing rock with immobilized hydrocarbon-oxidizing bacteria. The use of a biogeosorbent based on thermally activated vermiculite can reduce the cleaning time to 20–22 months, and based on glauconite-containing rock – up to 17 months, while without treatment this period will be at least 29 months.

Myazin, V. A. et al. 2024. Effectiveness of biogeosorbents based on mineral carriers for treatment oil-contaminated soil. *Vestnik of MSTU*, 27(1), pp. 91–102. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-1-91-102>.

## Введение

В настоящее время в мире широко применяются методы очистки почвы и воды от углеводов с использованием сорбентов (Pabis-Mazgaj et al., 2022; Guirado et al., 2021; Алексанян и др., 2020; Zhang et al., 2019; Vidal et al., 2019; Bandura et al., 2017), которые подразделяются на неорганические, органические, органоминеральные и синтетические. Глины и диатомиты используются в качестве сорбентов в силу своей доступности и низкой стоимости (Al-Jammal et al., 2019; Алексеева и др., 2017; Vuzimov et al., 2018; Shchemelinina et al., 2017). Многие сорбенты малоэффективны, имеют низкую сорбционную емкость и не способны удерживать легкие углеводороды. Результаты исследования эффективности сорбентов в отношении нефти и нефтепродуктов, полученные при стандартных условиях, отличаются от данных, касающихся поведения сорбентов в реальных условиях, из-за ряда факторов природного и антропогенного характера, которые не учитываются производителями сорбционных материалов (Васильева и др., 2023). Повысить эффективность сорбентов может иммобилизация на их поверхности углеводородоксилирующих микроорганизмов (Costa et al., 2014; Lin et al., 2014). Сорбенты с иммобилизованными клетками микроорганизмов являются центрами деструкции углеводов, где субстрат находится в непосредственной близости к микробному сообществу. Сорбция углеводов на сорбенте также способствует снижению токсичности среды и предотвращает распространение загрязнения (Vasilyeva et al., 2020). Сорбенты на основе минерального сырья положительно влияют на газовоздушный и тепловой режим почвы, способствуют сохранению высокой численности микроорганизмов, что усиливает активность ферментов и протекание биохимических процессов (Vasilyeva et al., 2022; Myazin et al., 2021; Мязин и др., 2020).

В ходе исследований (Щемелинина и др., 2018) смоделированы биогеосорбенты на основе глинистых и цеолитовых пород с иммобилизованными на них микроорганизмами, обладающими углеводородоксилирующей активностью. Полученные биогеосорбенты позволили снизить содержание нефтепродуктов в модельной воде в 2,5–5 раз, а биодеструкция нефтепродуктов за 4 сут составила 12–77 %.

Целью настоящей работы стала оценка эффективности биогеосорбентов с иммобилизованными углеводородоксилирующими бактериями, выделенными из почв Мурманской области, для очистки нефтезагрязненной почвы в лабораторных условиях и определения перспективы их дальнейшего использования при очистке территорий в условиях Севера.

## Материалы и методы

В качестве сорбентов для углеводородоксилирующих бактерий (УОБ) использовали минеральные носители на основе аналцитсодержащих пород Веслянской группы проявлений, глауконитсодержащих пород Чим-Лоптюгского месторождения горючих сланцев (Республика Коми) (Щемелинина и др., 2018; Shchemelinina et al., 2019; Симакова, 2016; Shushkov et al., 2023) и термоактивированного вермикулита Ковдорского месторождения (Мурманская область).

Для иммобилизации минеральные сорбенты заливали бактериальной суспензией (соотношение сорбентов и суспензии составляло 1:6, титр клеток –  $10^9$  кл./г), содержащей штаммы углеводородоксилирующих бактерий, относящихся к родам *Pseudomonas* и *Microbacterium*, и перемешивали в течение 1 ч с помощью верхнеприводной мешалки. Используемые штаммы были выделены из загрязненных почв Мурманской области (данные штаммы находятся в коллекции микроорганизмов Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, г. Апатиты). После перемешивания сорбент отфильтровывали с применением фильтра "Белая лента" и высушивали в сушильном шкафу при температуре 35 °С. Высушенные сорбенты хранили при комнатной температуре в герметичной упаковке.

Определение численности бактериальных клеток на биогеосорбентах проводили методом посева на мясопептонный агар через 1 сут после иммобилизации, а также через 3 и 9 месяцев хранения.

Исследование поверхности биогеосорбентов и элементный анализ проводили через 15 сут после иммобилизации, через 6 и 12 месяцев хранения в центре коллективного пользования "Геонаука" на базе Института геологии Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар) с помощью сканирующего электронного микроскопа Axia ChemiSEM, оборудованного энергодисперсионной приставкой при ускоряющем напряжении 5 кВ и токе 0,18–0,49 нА. Предварительно образцы покрывали углеродной или золотой пленкой.

Для исключения вероятности токсического воздействия на растения при очистке почвы с использованием сорбентов был проведен тест на фитотоксичность. Почву просеивали через сито с ячейками диаметром 5 мм и увлажняли до 60–70 % от полной влагоемкости. Увлажненную почву помещали в пластиковые контейнеры объемом 400 мл (масса почвы 200 г). Используемые сорбенты добавляли к почве в количестве 2 % от массы почвы и тщательно перемешивали. После внесения сорбентов в каждый контейнер с почвой было посеяно 15 семян пшеницы, которые предварительно проращивались в течение 24 ч в чашке Петри при температуре 27 °С. Тест проводили при комнатной температуре в течение 7 сут, после чего измеряли высоту побегов и длину корней.

Для оценки эффективности биогеосорбентов при очистке нефтезагрязненных почв был проведен лабораторный опыт продолжительностью 3 месяца. Почву просеивали через сито (диаметр ячеек 5 мм) и увлажняли до 60–70 % от полной влагоемкости. В качестве загрязняющего вещества использовали образец тяжелой нефти Приразломного месторождения в количестве 1 % от массы почвы. Нефть вносили в почву и тщательно перемешивали, после чего загрязненную почву раскладывали в пластиковые контейнеры объемом 400 мл (масса почвы 200 г). Подготовленные биогеосорбенты добавляли к почве в количестве 2 % от массы почвы и тщательно перемешивали. Схема лабораторного опыта и используемые биогеосорбенты представлены в табл. 1. В течение эксперимента почву увлажняли и перемешивали 2 раза в неделю.

Таблица 1. Схема лабораторного эксперимента по оценке эффективности иммобилизованных минеральных сорбентов

Table 1. Scheme of the laboratory experiment to assess the effectiveness of immobilized mineral sorbents

Вариант	Сорбент-носитель	Наличие УОБ	Наличие нефти
BG (контроль)	Нет	Нет	Нет
CS	Нет	Нет	Есть
A	Анальцимсодержащая порода, крупность –0,25 ... +0,1 мм	Есть	Есть
AC	Анальцимсодержащая порода с карбонатами, крупность –0,25 ... +0,1 мм	Есть	Есть
G	Глауконитсодержащая порода, крупность –0,25 ... +0,1 мм	Есть	Есть
GC	Глауконитсодержащая порода с карбонатами, крупность –0,25 ... +0,1 мм	Есть	Есть
VER1	Термоактивированный вермикулит, крупность –2 ... +0,45 мм	Есть	Есть
VER2	Термоактивированный вермикулит, крупность –5 ... +2 мм	Есть	Есть

Отбор и анализ образцов почвы проводили через 15, 30 и 90 сут после начала лабораторного эксперимента. Суммарное содержание углеводов в почве определяли методом ИК-спектроскопии, основанном на экстракции углеводов четыреххлористым углеродом, очисткой экстракта на колонке с окисью алюминия и последующим определением концентрации углеводов в элюате на анализаторе нефтепродуктов АН-2 согласно методике ПНД Ф 16.1:2.2.22-98<sup>1</sup>. Величину pH водной вытяжки почв определяли потенциометрическим методом на pH-метре Radelkis OP-300. Активность почвенной дегидрогеназы оценивали колориметрическим методом, основанным на восстановлении бесцветной соли 2,3,5-трифенилтетразолия хлористого до красного трифенилформазана (Мунеев, 2001).

Статистический анализ данных проводился с использованием прикладных программ Statistica 6.0 и Microsoft Excel 2007. Для определения достоверности различий между выборками использовали *t*-критерий Стьюдента. Для расчета коэффициента корреляции *r* использовался метод Пирсона (уровень значимости 0,05).

## Результаты и обсуждение

### *Динамика численности иммобилизованных бактерий на сорбентах-носителях*

Численность бактерий на биогеосорбентах через 1 сут после их иммобилизации и высушивания находилась в диапазоне  $10^9$ – $20^9$  кл./г. Через три месяца хранения количество бактерий на минеральных носителях достоверно не изменилось, за исключением термоактивированного вермикулита. Через 9 месяцев хранения численность углеводородокисляющих бактерий снизилась на всех биогеосорбентах, кроме глауконитсодержащей породы и термоактивированного вермикулита (рис. 1). Однако количество бактерий на сорбентах все еще оставалось достаточно высоким ( $10^7$ – $10^8$  кл./г). Это позволяет хранить биогеосорбенты без значительного снижения численности иммобилизованных микроорганизмов до момента их использования.

<sup>1</sup> ПНД Ф 16.1:2.2.22-98. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органогенных, органоминеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектроскопии. Введен 10 ноября 1998 г. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293831/4293831615.htm>.

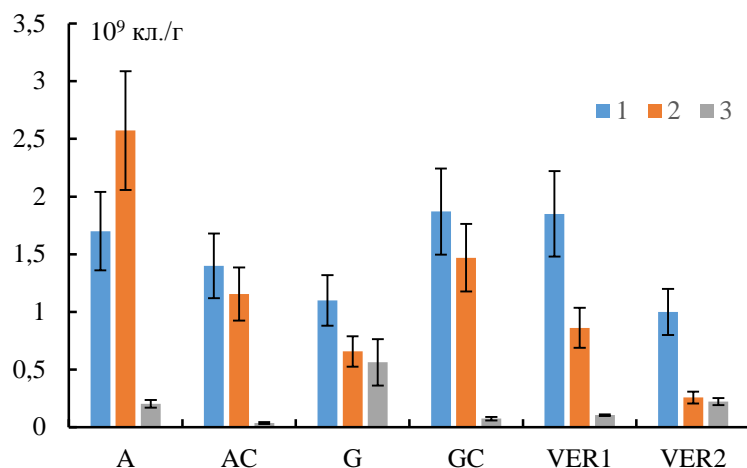


Рис. 1. Численность бактериальных клеток ( $10^9$  кл./г) на поверхности биогеосорбентов через сутки после иммобилизации (1), через 3 месяца (2) и 9 месяцев хранения (3)  
 Fig. 1. The number of bacterial cells ( $10^9$  cells/g) on the surface of biogeosorbents one day after immobilization (1), after 3 months (2), and 9 months of storage (3)

Исследование биогеосорбентов с использованием сканирующего электронного микроскопа, выполненное через 15 сут после иммобилизации, показало наличие бактериальной пленки на поверхности минеральных носителей (рис. 2).

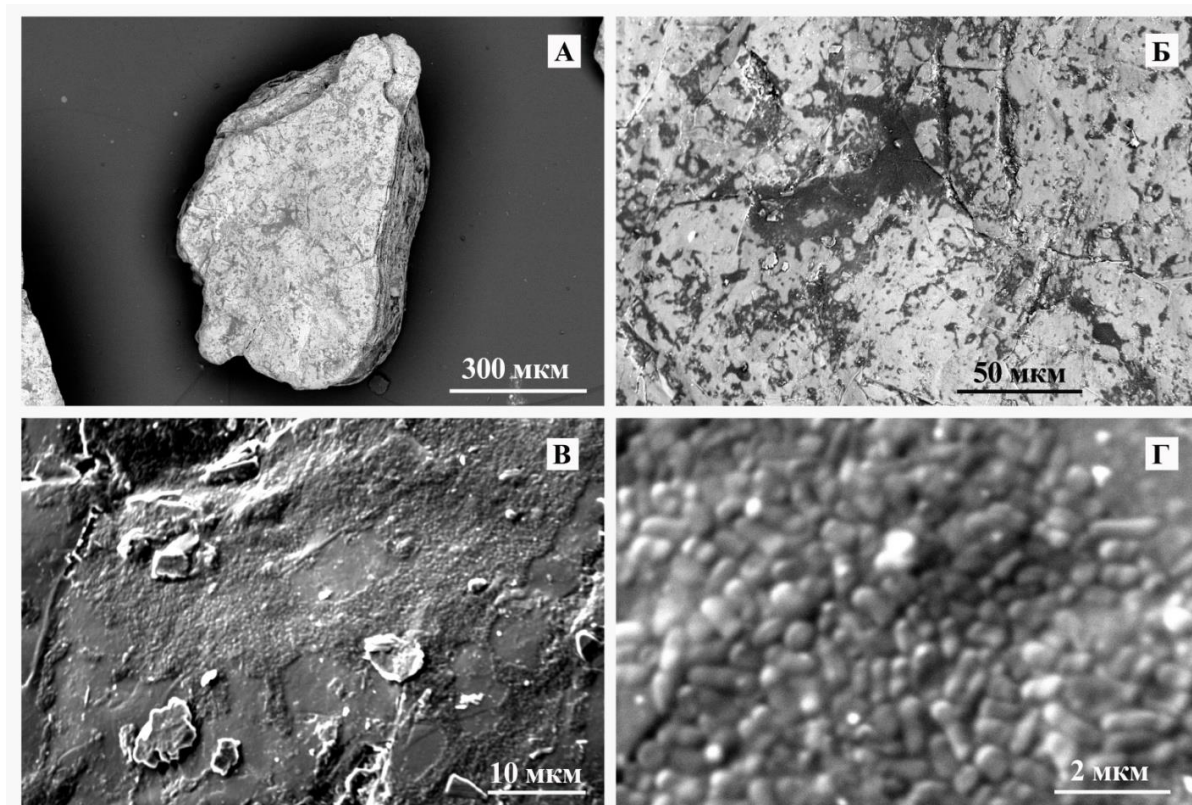


Рис. 2. Бактериальная пленка на поверхности зерен термоактивированного вермикулита через 15 сут после иммобилизации. СЭМ-изображения, режим обратно-рассеянных электронов  
 Fig. 2. Bacterial film on the surface of grains of thermally activated vermiculite in 15 days after immobilization. SEM images, backscattered electron mode

Через 6 и 12 месяцев хранения биогеосорбентов бактериальная пленка на их поверхности сохранилась, что подтверждается результатами проведенной сканирующей электронной микроскопии (рис. 3).

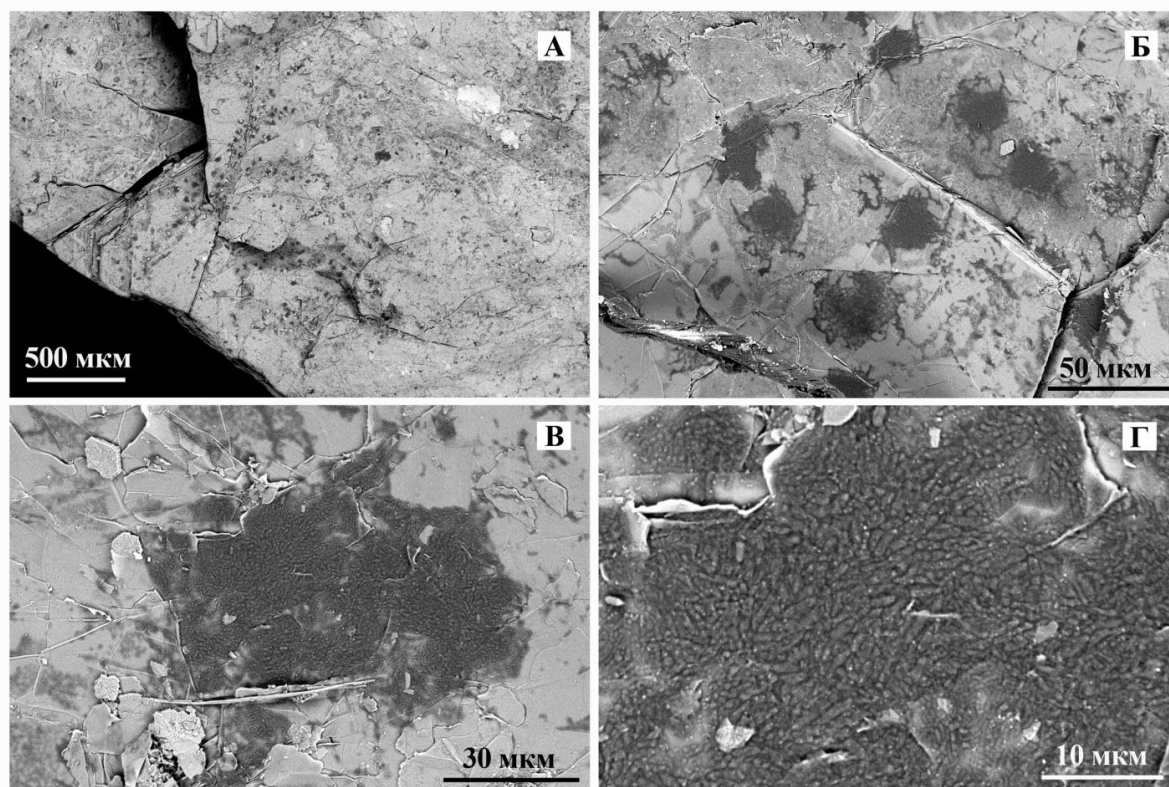
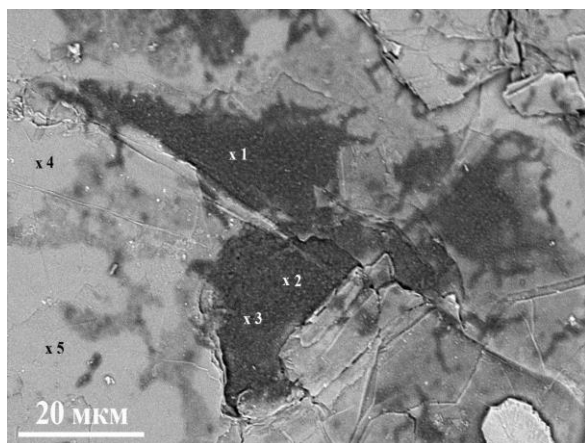


Рис. 3. Бактериальная пленка на поверхности зерен термоактивированного вермикулита через 12 месяцев после иммобилизации. СЭМ-изображения, режим обратно-рассеянных электронов  
 Fig. 3. Bacterial film on the surface of grains of thermally activated vermiculite in 12 months after immobilization. SEM images, backscattered electron mode

На основании рентгеноспектрального микроанализа через 12 месяцев хранения биогеосорбентов подтверждено наличие бактериальной пленки, представленной органическими соединениями (рис. 4).



Элемент	Мас.%				
	1	2	3	4	5
C	27,4	23,7	29,4	–	–
N	13,5	10,9	14,9	–	–
O	59,1	65,4	55,6	43,3	45,8
Na	–	–	–	0,8	0,8
Mg	–	–	–	18,3	17,9
Al	–	–	–	8,8	8,6
Si	–	–	–	22,6	21,4
K	–	–	–	0,2	0,0
Ca	–	–	–	0,2	0,2
Ti	–	–	–	0,6	0,5
Fe	–	–	–	5,2	4,8

Рис. 4. Точки рентгеноспектрального микроанализа бактериальной пленки (1–3) и поверхности вермикулита (4, 5). СЭМ-изображения, режим обратно-рассеянных электронов  
 Fig. 4. EDS points of bacterial film (1–3) and vermiculite surface (4, 5). SEM images, backscattered electron mode

Таким образом, в ходе исследования было показано, что бактериальная пленка, образующаяся на поверхности минеральных сорбентов после иммобилизации, сохраняется в течение 12 месяцев хранения в воздушно-сухом состоянии. Численность бактерий, определенная методом посева, снижается незначительно, что позволяет использовать предлагаемые минеральные сорбенты для закрепления углеводородоксилирующих микроорганизмов и последующего их применения при очистке и восстановлении нефтезагрязненных почв и грунтов.

*Фитотоксичность сорбентов*

Внесение в чистую почву минеральных сорбентов стимулирует рост пшеницы, не оказывая негативного влияния на растения. Высота побегов и длина корней проростков в вариантах с добавлением минеральных сорбентов через 7 дней была достоверно выше, чем в контрольном варианте, в среднем на 70 % ( $t = 3,12-8,82$  и  $t = 3,22-7,57$  соответственно;  $df = 13$ ;  $p = 0,95$ ) (табл. 2).

Таблица 2. Высота побегов и длина корней проростков пшеницы через 7 сут после посева  
Table 2. Shoot height and root length of wheat seedlings in 7 days after sowing

Вариант	Высота побега, см	Длина корня, см
BG	9,0 ± 0,9	6,7 ± 0,8
A	13,2 ± 1,0	10,5 ± 0,4
AC	<b>16,1 ± 0,9</b>	<b>11,6 ± 0,5</b>
G	15,4 ± 0,7	10,6 ± 0,4
GC	<b>17,3 ± 0,2</b>	10,8 ± 0,5
VER1	13,8 ± 1,0	10,5 ± 0,7
VER2	15,3 ± 0,8	<b>12,1 ± 0,6</b>

Максимальная высота проростков пшеницы была отмечена для вариантов с внесением анальцимсодержащей породы с карбонатами и глауконитсодержащей породы с карбонатами, а максимальная длина корней – для варианта с внесением термоактивированного вермикулита (крупность зерен –5 ... +2 мм) и анальцимсодержащей породы с карбонатами.

Стимуляция роста побегов и корней пшеницы обусловлена улучшением структуры почвы, увеличением влагоемкости, а также смещением величины pH из слабокислого в нейтральный диапазон, что ярче всего проявилось при использовании сорбентов на основе карбонатсодержащих пород. Положительное влияние исследуемых сорбентов на рост и развитие растений может быть одним из факторов их успешного применения для очистки и восстановления нефтезагрязненных почв.

*Влияние биогеосорбентов на численность бактерий в загрязненной почве*

Численность бактерий в загрязненной почве через 1 сут после начала эксперимента не превышала 1,5 млн кл./г, а через 15 сут достигла 50 млн кл./г, что связано с активизацией аборигенных УОБ, для которых углеводороды являются источником углерода, а также с улучшением аэрации и водного режима. Внесение биогеосорбентов резко увеличило численность бактерий. Наиболее сильный рост был отмечен при использовании сорбентов на основе анальцимсодержащей породы с карбонатами (518 млн кл./г), глауконитсодержащей породы (481 млн кл./г) и глауконитсодержащей породы с карбонатами (432 млн кл./г). Наименьшая численность бактерий была характерна для почвы с добавлением сорбента на основе анальцимсодержащей породы (126 млн кл./г). Через месяц наблюдалась схожая тенденция с некоторым снижением численности почвенных бактерий в вариантах с внесением сорбентов на основе глауконитсодержащей породы (рис. 5).

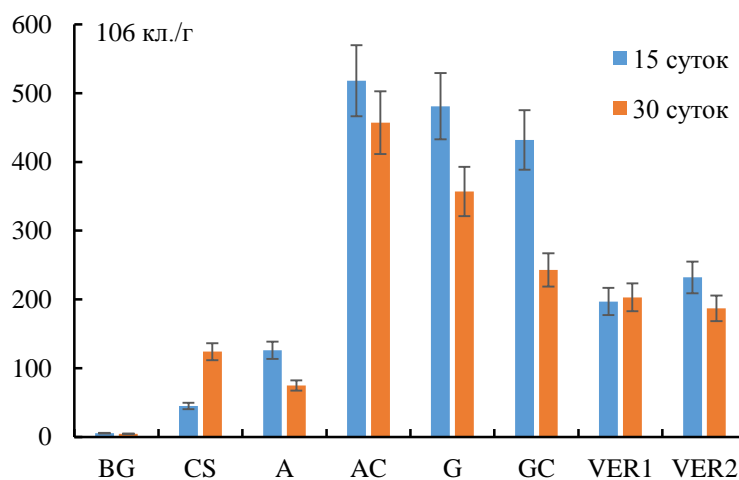


Рис. 5. Динамика численности бактерий в почве при ее очистке от нефтепродуктов с использованием биогеосорбентов

Fig. 5. Dynamics of the number of bacteria in the soil during its treatment from oil products using biogeosorbents

#### Влияние биогеосорбентов на активность дегидрогеназы в загрязненной почве

Активность дегидрогеназы – почвенного фермента из класса оксидоредуктаз – является показателем жизнедеятельности микроорганизмов. Эти ферменты катализируют дегидрирование органических веществ, в том числе углеводов в загрязненной почве. Дегидрогеназа – это внеклеточный фермент преимущественно бактериального происхождения, поэтому его высокая активность является следствием деятельности бактерий.

Дегидрогеназная активность в чистой почве составляла 0,49 мг·ТФФ/10 г, что характеризует ее как слабую (Гапонюк и др., 1985), а почву – как очень бедную по степени обогащенности дегидрогеназой (Звягинцев, 1978). В загрязненной почве в результате развития аборигенных УОБ активность дегидрогеназы возросла до среднего уровня (0,69 мг·ТФФ/10 г). Использование биогеосорбентов достоверно увеличило активность фермента в 1,8–2,7 раз до высокого и очень высокого уровня за исключением вариантов с термоактивированным вермикулитом. В то же время по степени обогащенности дегидрогеназой почва осталась бедной (рис. 6).

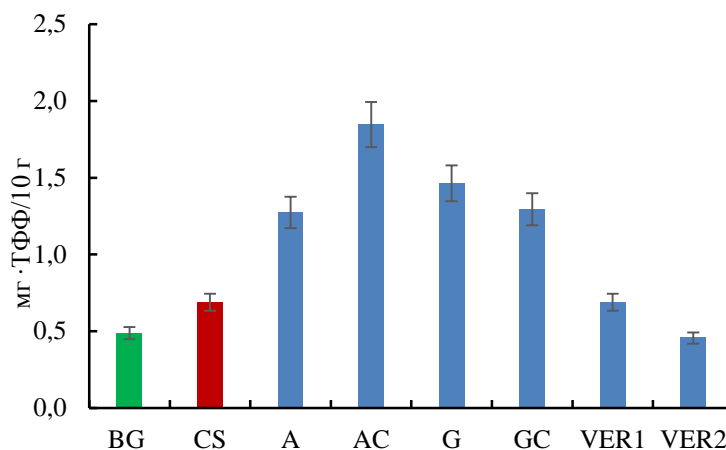


Рис. 6. Активность дегидрогеназы в почве через 3 месяца после начала эксперимента  
Fig. 6. Dehydrogenase activity in soil 3 months after the start of the experiment

В ходе исследования установлено, что дегидрогеназная активность положительно коррелирует с численностью бактерий в почве ( $r = 0,75–0,93$ ;  $t = 4,46–10,26$ ;  $df = 14,0$ ;  $p = 0,05$ ).

#### Влияние биогеосорбентов на содержание углеводов в загрязненной почве

Исходное содержание углеводов в почве через 1 сут после внесения нефти составляло  $4\,527 \pm 860$  мг/кг, что соответствует высокой степени загрязнения<sup>2</sup> (Пиковский, 1993; Московченко, 1998).

Содержание углеводов в загрязненной почве без использования биогеосорбентов в течение 15 сут снизилось лишь на 4 %. Внесение биогеосорбентов привело к снижению содержания углеводов на 25 %, а скорость деструкции углеводов достигала 100 мг/сут (среднее значение  $75 \pm 8$  мг/сут). Наиболее эффективными биогеосорбентами на данном этапе были анальцимсодержащая порода с карбонатами и термоактивированный вермикулит (–5 ... +2 мм).

Через 30 сут за счет самоочищения почвы количество углеводов сократилось на 26 %, а использование биогеосорбентов привело к снижению содержания углеводов в среднем на 31 %. Скорость деструкции углеводов при этом снизилась до 20–55 мг/сут. Наиболее эффективными биогеосорбентами через 1 месяц были глауконитсодержащая порода с карбонатами и термоактивированный вермикулит. При этом достоверной разницы между сорбентами в эффективности деструкции углеводов не обнаружено.

В дальнейшем скорость деструкции углеводов заметно снизилась во всех вариантах. Через 90 сут за счет самоочищения количество углеводов уменьшилось на 28 % от исходного значения. Использование биогеосорбентов привело к снижению содержания углеводов в среднем на 36 %. Наиболее эффективными биогеосорбентами через 3 месяца были глауконитсодержащая порода и термоактивированный вермикулит (рис. 7).

<sup>2</sup> См.: Методические рекомендации по выявлению деградированных и загрязненных земель. Письмо Комитета Российской Федерации по земельным ресурсам и землеустройству от 27 марта 1995 г. № 3-15/582; Порядок определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами. Письмо Министерства охраны окружающей среды и природных ресурсов Российской Федерации от 27 декабря 1993 г. № 04-25/61-5678.

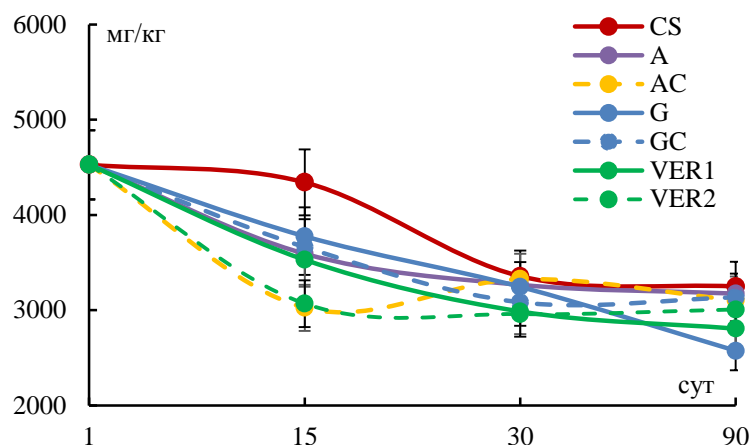


Рис. 7. Динамика содержания углеводородов при очистке почвы от нефтепродуктов с использованием биогеосорбентов  
 Fig. 7. Dynamics of hydrocarbon content in the soil during its treatment from oil products using biogeosorbents

Внесение биогеосорбентов позволило на первом этапе (15 сут) в 3–8 раз ускорить трансформацию углеводородов. К концу первого месяца этот эффект ослаб и скорость деструкции углеводородов снизилась, что может быть вызвано трансформацией большей части доступных для микробиологической деструкции углеводородов. Оставшиеся высокомолекулярные соединения в меньшей степени подвержены биоокислению или требуют более продолжительного времени для этого процесса.

Наиболее эффективным оказалось внесение биогеосорбентов на основе термоактивированного вермикулита и глауконитсодержащей породы, что увеличило степень деструкции до 38 и 43 % соответственно. Расчетный период (*Bashkin et al., 2019*) самоочистки загрязненной почвы до фоновых значений содержания углеводородов составит не менее 29 месяцев, в то время как внесение биогеосорбента на основе термоактивированного вермикулита позволит сократить его до 20 месяцев, а на основе глауконитсодержащей породы – до 17 месяцев.

### Заключение

Проведенные исследования показали, что численность иммобилизованных бактерий на исследуемых биогеосорбентах оставалась высокой на протяжении 9 месяцев хранения, а бактериальная пленка, образующаяся на поверхности минеральных сорбентов после иммобилизации, сохраняется в течение 12 месяцев хранения в воздушно-сухом состоянии, что позволяет использовать их для очистки и восстановления нефтезагрязненных почв.

Используемые минеральные сорбенты не оказали негативного влияния на растения, напротив, отмечено увеличение высоты проростков и длины корней тест-растений.

Внесение биогеосорбентов в загрязненную почву резко увеличило численность бактерий, способных к микробиологической трансформации нефтепродуктов, особенно на начальных этапах очистки, когда аборигенная микробиота еще не адаптировалась к изменившимся условиям.

Использование биогеосорбентов повысило степень очистки почвы от углеводородов нефти в течение первых 15 сут. Среди исследованных биогеосорбентов наиболее эффективными были термоактивированный вермикулит (крупность зерен  $-2 \dots +0,45$  мм) и глауконитсодержащая порода, внесение которых позволило трансформировать до 38–43 % углеводородов. Биогеосорбент на основе глауконитсодержащей породы также способствовал значительному увеличению активности дегидрогеназы и численности бактерий в загрязненной почве. Биогеосорбенты на основе анальцимсодержащей породы оказались менее эффективными, но также способствовали росту численности углеводородоксиляющих бактерий и активности дегидрогеназы в почве.

Биогеосорбенты на основе минерального сырья могут применяться для очистки и восстановления почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами, способствуя более интенсивной деградации углеводородов на начальных этапах, что в конечном счете приведет к сокращению времени очистки. Высокая устойчивость бактериальной пленки на поверхности минеральных носителей позволяет хранить их в течение длительного времени без значительной потери своих свойств; при этом для биогеосорбентов не требуется специальных условий хранения и дополнительной подготовки перед использованием. Более полная информация о способах применения биогеосорбентов в различных условиях, в том числе в Арктическом регионе, будет получена в ходе проведения дополнительных лабораторных и натурных полевых исследований.



### Благодарности

Работа выполнена в рамках темы НИР 122022400109-7 "Микробиота природных сред Арктической зоны и разработка способов охраны и реабилитации окружающей среды с использованием биотехнологического потенциала микроорганизмов" и на основе договора о научном сотрудничестве между Институтом геологии им. Н.П. Юшкина КомиНЦ УрО РАН и Институтом проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Библиографический список

- Александрян К. Г., Киялкова А. Ю., Еремин И. С., Стоколос О. А. [и др.]. Нефтяные сорбенты на основе природных материалов // Нефтегазохимия. 2020. № 1. С. 57–60. DOI: <https://doi.org/10.24411/2310-8266-2020-10110>. EDN: WFELKC.
- Алексеева Т. П., Бурмистрова Т. И., Трунова Н. М., Наумова Л. Б. [и др.]. Оценка эффективности использования цеолита для ускорения деструкции нефти в почве // Биотехнология. 2017. Т. 33, № 4. С. 85–91. DOI: <http://doi.org/10.21519/0234-2758-2017-33-4-85-91>. EDN: ZEULXB.
- Васильева Ж. В., Васеха М. В., Тюляев В. С. Оценка эффективности сорбентов для реагирования на аварийные разливы нефти в арктической акватории // Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 856–864. DOI: <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.14>. EDN: NVFPPM.
- Гапонюк Э. И., Малахов С. В. Комплексная система показателей экологического мониторинга почв // Миграция загрязняющих веществ в почвах и сопредельных средах : тр. IV Всесоюзного совещания. Обнинск, июнь 1983 г. Л. : Гидрометеиздат, 1985. С. 3–10.
- Звягинцев Д. Г. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение. 1978. № 6. С. 48–55.
- Московченко Д. В. Нефтегазодобыча и окружающая среда. Эколого-геохимический анализ Тюменской области. Новосибирск : Наука, 1998. 110 с.
- Мязин В. А., Исакова Е. А., Васильева Г. К. Влияние гранулированного активированного угля на скорость биоремедиации почв Мурманской области, исторически загрязненных нефтепродуктами // Проблемы региональной экологии. 2020. № 2. С. 20–26. DOI: <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2020-12020>. EDN: OFUBVP.
- Пиковский Ю. И. Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. М. : Изд-во МГУ, 1993. 208 с.
- Практикум по агрохимии / под ред. В. Г. Минеева. М. : Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
- Симакова Ю. С. Особенности глобулярных слоистых силикатов Чим-Лоптюгского месторождения горючих сланцев // Вестник Института геологии Коми научного центра УрО РАН. 2016. № 9–10 (261–262). С. 52–57. DOI: <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2016-10-52-57>. EDN: XBFBJZ.
- Щемелинина Т. Н., Котова О. Б., Анчугова Е. М., Шушков Д. А. [и др.]. Цеолитовое и глинистое сырье: экспериментальное моделирование биогеосорбентов // Вестник Института геологии Коми научного центра УрО РАН. 2018. № 9(285). С. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2018-9-50-57>. EDN: YRIVPV.
- Al-Jammal N., Juzsakova T., Zsirka B., Sebestyen V. [et al.]. Modified Jordanian zeolitic tuff in hydrocarbon removal from surface water // Journal of Environmental Management. 2019. Vol. 239. P. 333–341. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.079>.
- Bandura L., Wozzuk A., Kolodynska D., Franus W. Application of mineral sorbents for removal of petroleum substances: A review // Minerals. 2017. Vol. 7, Iss. 3. Article number: 37. DOI: <https://doi.org/10.3390/min7030037>.
- Bashkin V. N., Galiulin R. V. Geoecological risk management in polar areas. Switzerland : Springer Verlag, 2019. 156 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-04441-1>.
- Buzimov A. Y., Eckl W., Gömze L. A., Kocserha I. [et al.]. Effect of mechanical treatment on properties of Si-Al-O zeolites // Epitoanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials. 2018. Vol. 70, N 1. P. 23–26. DOI: <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2018.5>.
- Costa S. P., Angelim A. L., de Fatima Vieira de Queiroz Sousa M., Melo V. M. M. Vegetative cells of *Bacillus pumilus* entrapped in chitosan beads as a product for hydrocarbon biodegradation // International Biodeterioration and Biodegradation. 2014. Vol. 87. P. 122–127. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.11.011>.
- Guirado M., Garrido-Sanz D., Pindado O., Rodríguez-Rastrero M. [et al.]. Effectiveness of biochar application and bioaugmentation techniques for the remediation of freshly and aged diesel-polluted soils // International Biodeterioration and Biodegradation. 2021. Vol. 163. Article number: 105259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2021.105259>.

- Lin M., Liu Y., Chen W., Wang H. [et al.]. Use of bacteria-immobilized cotton fibers to absorb and degrade crude oil // *International Biodeterioration and Biodegradation*. 2014. Vol. 88. P. 8–12. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.11.015>.
- Myazin V. A., Korneykova M. V., Chaporgina A. A., Fokina N. V. [et al.]. The effectiveness of biostimulation, bioaugmentation and sorption-biological treatment of soil contaminated with petroleum products in the Russian Subarctic // *Microorganisms*. 2021. Vol. 9, Iss. 8. Article number: 1722. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms9081722>.
- Pabis-Mazgaj E., Pichniarczyk P., Stempkowska A., Gawenda T. Possibility of using natural zeolite waste granules obtained by pressure agglomeration as a sorbent for petroleum substances from paved surfaces // *Materials*. 2022. Vol. 15, Iss. 19. Article number: 6871. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15196871>.
- Shchemelinina T. N., Gömze L. A., Kotova O. B., Ibrahim J. E. F. M. [et al.]. Clay- and zeolite-based biogeosorbents: Modelling and properties // *Epitoanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*. 2019. Vol. 71, N 4. P. 131–137. DOI: <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2019.23>.
- Shchemelinina T. N., Kotova O. B., Harja M., Anchugova E. M. [et al.]. New trends in the mechanisms of increasing productivity of mineral-based materials // *Вестник Института геологии Коми научного центра УрО РАН*. 2017. № 6 (270), С. 40–42. DOI: <http://doi.org/10.19110/2221-1381-2017-6-40-42>. EDN: ZCRBPJ.
- Shushkov D. A., Kotova O. B., Sun S., Harja M. Physico-chemical properties of analcime-bearing rocks of Timan // XIII General Meeting of the Russian Mineralogical Society and the Fedorov Session. GMRMS 2021. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham., 2023. P. 514–522. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-23390-6\\_65](https://doi.org/10.1007/978-3-031-23390-6_65).
- Vasilyeva G., Kondrashina V., Strijakova E., Ortega-Calvo J-J. Adsorptive bioremediation of soil highly contaminated with crude oil // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 706. Article number: 135739. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135739>.
- Vasilyeva G., Mikhedova E., Zinnatshina L., Strijakova E. [et al.]. Use of natural sorbents for accelerated bioremediation of grey forest soil contaminated with crude oil // *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 850. Article number: 157952. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157952>.
- Vidal R. R. L., Moraes J. S. Removal of organic pollutants from wastewater using chitosan: A literature review // *International Journal Environmental Science Technology*. 2019. Vol. 16. P. 1741–1754. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2061-8>.
- Zhang T., Li Z., Lü Y., Liu Y. [et al.]. Recent progress and future prospects of oil-absorbing materials // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2019. Vol. 27, Iss. 6. P. 1282–1295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2018.09.001>.

## References

- Aleksyan, K. G., Kilyakova, A. Yu., Eremin, I. S., Stokolos, O. A. et al. 2020. Oil sorbents based on natural materials. *Oil & Gas Chemistry*, 1, pp. 57–60. DOI: <https://doi.org/10.24411/2310-8266-2020-10110>. EDN: WFELKC. (In Russ.)
- Alekseeva, T. P., Burmistrova, T. I., Trunova, N. M., Naumova, L. B. et al. 2017. Evaluation of the effectiveness of using zeolite to accelerate the destruction of oil in soil. *Biotechnology in Russia*, 33(4), pp. 85–91. DOI: <http://doi.org/10.21519/0234-2758-2017-33-4-85-91>. EDN: ZEULXB. (In Russ.)
- Vasilyeva, Zh. V., Vasekha, M. V., Tyulyaev, V. S. 2023. Evaluation of the efficiency of sorbents for accidental oil spill response in the Arctic waters. *Journal of Mining Institute*, 264, pp. 856–864. DOI: <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.14>. EDN: NVFPPM. (In Russ.)
- Gaponyuk, E. I., Malakhov, S. V. 1985. Integrated system of indicators for environmental monitoring of soils. In coll. articles *Proceedings of the 4th All-Union Conference*. Leningrad, pp. 3–10. (In Russ.)
- Zvyagintsev, D. G. 1978. Biological activity of soils and scales for assessing some of its indicators. *Soviet Soil Science*, 6, pp. 48–55. (In Russ.)
- Moskovchenko, D. V. 1998. Oil and gas production and the environment: Ecological and geochemical analysis of the Tyumen region. Novosibirsk. (In Russ.)
- Myazin, V. A., Isakova, E. A., Vasilyeva, G. K. 2020. The effect of activated carbon on the bioremediation rate of the soils historically contaminated with oil products in the Murmansk region. *Regional Environmental Issues*, 2, pp. 20–26. DOI: <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2020-12020>. EDN: OFUBVP. (In Russ.)
- Pikovskiy, Yu. I. 1993. Natural and technogenic flows of hydrocarbons in the environment. Moscow. (In Russ.)
- Workshop on agrochemistry. 2001. Ed. V. G. Mineev. Moscow. (In Russ.)
- Simakova, Yu. S. 2016. Features of globular layered silicates of the Chim-Loptyug oil shale deposit. *Vestnik of Institute of Geology of Komi Science Center of Ural Branch RAS*, 9–10 (261–262), pp. 52–57. DOI: <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2016-10-52-57>. EDN: XBFBJZ. (In Russ.)
- Shchemelinina, T. N., Kotova, O. B., Anchugova, E. M., Shushkov, D. A. et al. 2018. Zeolite and clay raw materials: Experimental modeling of biogeosorbents. *Vestnik of Institute of Geology of Komi Science Center*

- of Ural Branch RAS*, 9(285), pp. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2018-9-50-57>. EDN: YRIVPV. (In Russ.)
- Al-Jammal, N., Juzsakova, T., Zsirka, B., Sebestyen, V. et al. 2019. Modified Jordanian zeolitic tuff in hydrocarbon removal from surface water. *Journal of Environmental Management*, 239, pp. 333–341. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.079>.
- Bandura, L., Wozzuk, A., Kolodynska, D., Franus, W. 2017. Application of mineral sorbents for removal of petroleum substances: A review. *Minerals*, 7(3). Article number: 37. DOI: <https://doi.org/10.3390/min7030037>.
- Bashkin, V. N., Galiulin, R. V. 2019. Geocological risk management in polar areas. Switzerland: Springer Verlag. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-04441-1>.
- Buzimov, A. Y., Eckl, W., Gömze, L. A., Kocserha, I. et al. 2018. Effect of mechanical treatment on properties of Si-Al-O zeolites. *Epitoanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*, 70(1), pp. 23–26. DOI: <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2018.5>.
- Costa, S. P., Angelim, A. L., de Fatima Vieira de Queiroz Sousa, M., Melo, V. M. M. 2014. Vegetative cells of *Bacillus pumilus* entrapped in chitosan beads as a product for hydrocarbon biodegradation. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 87, pp. 122–127. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.11.011>.
- Guirado, M., Garrido-Sanz, D., Pindado, O., Rodríguez-Rastrero, M. et al. 2021. Effectiveness of biochar application and bioaugmentation techniques for the remediation of freshly and aged diesel-polluted soils. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 163. Article number: 105259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2021.105259>.
- Lin, M., Liu, Y., Chen, W., Wang, H. et al. 2014. Use of bacteria-immobilized cotton fibers to absorb and degrade crude oil. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 88, pp. 8–12. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.11.015>.
- Myazin, V. A., Korneykova, M. V., Chaporgina, A. A., Fokina, N. V. et al. 2021. The effectiveness of biostimulation, bioaugmentation and sorption-biological treatment of soil contaminated with petroleum products in the Russian Subarctic. *Microorganisms*, 9(8). Article number: 1722. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms9081722>.
- Pabis-Mazgaj, E., Pichniarczyk, P., Stempkowska, A., Gawenda, T. 2022. Possibility of using natural zeolite waste granules obtained by pressure agglomeration as a sorbent for petroleum substances from paved surfaces. *Materials*, 15(19). Article number: 6871. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15196871>.
- Shchemelinina, T. N., Gömze, L. A., Kotova, O. B., Ibrahim, J. E. F. M. et al. 2019. Clay- and zeolite-based biogeosorbents: Modelling and properties. *Epitoanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*, 71(4), pp. 131–137. DOI: <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2019.23>.
- Shchemelinina, T. N., Kotova, O. B., Harja, M., Anchugova, E. M. et al. 2017. New trends in the mechanisms of increasing productivity of mineral-based materials. *Vestnik of Institute of Geology of Komi Science Center of Ural Branch RAS*, 6(270), pp. 40–42. DOI: <http://doi.org/10.19110/2221-1381-2017-6-40-42>. EDN: ZCRBPJ.
- Shushkov, D. A., Kotova, O. B., Sun, S., Harja, M. 2023. Physico-chemical properties of analcime-bearing rocks of Timan. XIII General Meeting of the Russian Mineralogical Society and the Fedorov Session. GMRMS 2021. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham., pp. 514–522. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-23390-6\\_65](https://doi.org/10.1007/978-3-031-23390-6_65).
- Vasilyeva, G., Kondrashina, V., Strijakova, E., Ortega-Calvo, J.-J. 2020. Adsorptive bioremediation of soil highly contaminated with crude oil. *Science of the Total Environment*, 706. Article number: 135739. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135739>.
- Vasilyeva, G., Mikhedova, E., Zinnatshina, L., Strijakova, E. et al. 2022. Use of natural sorbents for accelerated bioremediation of grey forest soil contaminated with crude oil. *Science of the Total Environment*, 850. Article number: 157952. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157952>.
- Vidal, R. R. L., Moraes, J. S. 2019. Removal of organic pollutants from wastewater using chitosan: A literature review. *International Journal Environmental Science Technology*, 16, pp. 1741–1754. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2061-8>.
- Zhang, T., Li, Z., Lü, Y., Liu, Y. et al. 2019. Recent progress and future prospects of oil-absorbing materials. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 27(6), pp. 1282–1295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2018.09.001>.

#### Сведения об авторах

**Мязин Владимир Александрович** – мкр. Академгородок, 14А, г. Апатиты, Россия, 184209; Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, канд. биол. наук; e-mail: [v.myazin@ksc.ru](mailto:v.myazin@ksc.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4155-3416>

**Vladimir A. Myazin** – 14A, Akademgorodok, Apatity, Russia, 184209; Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Cand. Sci. (Biology); e-mail: [v.myazin@ksc.ru](mailto:v.myazin@ksc.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4155-3416>

**Шушков Дмитрий Александрович** – ул. Первомайская, 54, г. Сыктывкар, Россия, 167982;  
Институт геологии им. Н. П. Юшкина КомиНЦ УрО РАН, канд. геол.-мин. наук, ст. науч. сотрудник;  
e-mail: dashushkov@geo.komisc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7856-8080>

**Dmitry A. Shushkov** – 54 Pervomayskaya Str., Syktyvkar, Russia, 167982; Institute of Geology of Komi Science Centre of the Ural Branch RAS, Cand. Sci. (Geology&Mineralogy), Senior Researcher;  
e-mail: dashushkov@geo.komisc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7856-8080>

**Фокина Надежда Викторовна** – мкр. Академгородок, 14А, г. Апатиты, Россия, 184209;  
Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник;  
e-mail: n.fokina@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2936-5252>

**Nadezhda V. Fokina** – 14A Akademgorodok, Apatity, Russia, 184209; Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher;  
e-mail: n.fokina@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2936-5252>

**Чапоргина Александра Александровна** – мкр. Академгородок, 14А, г. Апатиты, Россия, 184209;  
Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, вед. инженер;  
e-mail: a.chaporgina@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8114-461X>

**Aleksandra A. Chaporgina** – 14A Akademgorodok, Apatity, Russia, 184209; Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Leading Engineer;  
e-mail: a.chaporgina@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8114-461X>

**Канивец Анастасия Витальевна** – мкр. Академгородок, 14А, г. Апатиты, Россия, 184209;  
Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, ст. лаборант;  
e-mail: kvi407@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9704-7368>

**Anastasiya V. Kanivets** – 14A Akademgorodok, Apatity, Russia, 184209;  
Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Senior Assistant;  
e-mail: kvi407@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9704-7368>

**Брянцев Александр Владимирович** – ул. Корпусная, 18, г. Санкт-Петербург, Россия, 197110;  
Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, вед. инженер;  
e-mail: briantsev@ecosafety-spb.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2307-6326>

**Aleksandr V. Bryantsev** – 18 Korpusnaya Str., St. Petersburg, Russia, 197110;  
Scientific Research Centre for Ecological Safety RAS, Leading Engineer;  
e-mail: briantsev@ecosafety-spb.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2307-6326>