



Биогеосорбент «Геолекс»: внедрение технологий в практику

Т. Н. Щемелинина¹, Е. М. Анчугова¹, О. Б. Котова²

Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар; tatyanakomi@mail.ru
Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар; kotova@geo.komisc.ru

Нефтегазовая промышленность играет ключевую роль в экономике России, однако по опасности воздействия на окружающую среду она занимает одно из первых мест среди отраслей современного производства. Необходимость скорейшего возвращения территорий в хозяйственный оборот требует оперативного устранения последствий нефтяного загрязнения почвенного покрова. Это достигается комплексом работ, включающим в том числе и биотехнологические продукты и технологии их использования. Объектами исследования были загрязненные почвы опытно-промышленных участков РК, ЯНАО, ХМАО. Методы, ускоряющие процессы восстановления почв, включали использование биогеосорбента «Геолекс», состоящего из глауконитсодержащей породы и иммобилизованных микроорганизмов-нефтедеструкторов биопрепарата «Биотрин». Внедренные биотехнологии усиливали процессы дегидрирования и окисления нефти и нефтепродуктов на загрязненных участках. К концу эксперимента дегидрогеназная активность рекультивируемых почв снижалась, что свидетельствовало о восстановительном характере сукцессии. Эффективность очистки от поллютантов на опытно-промышленных участках составила 68–95 % за 60 суток.

Ключевые слова: загрязнение почвы, нефть, нефтепродукты, биогеосорбент, опытно-промышленные испытания, очистка почвы.

The Geolex Biogeosorbent: practical application of technologies

T. N. Shchemelinina¹, E. M. Anchugova¹, O. B. Kotova²

Institute of Biology, FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, tatyanakomi@mail.ru
Institute of Geology, FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, kotova@geo.komisc.ru

The oil and gas industry plays a key role in the Russian economy. However, its risks of environmental impact are among the highest in modern production industries. The need for the fastest recovery of territories requires a prompt elimination of consequences of soil pollution with oil. This might be achieved by an extensive complex of technologies, including biotechnological product application. This study examined contaminated soils from experimental industrial sites of the Komi Republic, Yamal-Nenets Autonomous District, Khanty-Mansiysk Autonomous District. Practices accelerating the processes of soil restoration included the application of the Geolex biogeosorbent composed of a glauconite-bearing rock and immobilized oil-degraders of the BIOTRIN biopreparation. The biotechnologies embodied enhanced the processes of dehydrogenation and oxidation of oil and petroleum products. By the end of the experiment, the dehydrogenase activity of the soils recultivated decreased, which indicated the progressive succession. The efficiency of pollutant removal at pilot sites was 68–95 % in 60 days.

Keywords: soil pollution, oil, petroleum products, biogeosorbent, pilot tests, soil cleanup.

Введение

Уязвимость северных и арктических экосистем перед антропогенной нагрузкой обуславливает необходимость разработки эффективных биотехнологических методов, направленных на ускорение их восстановления. Актуальными направлениями экологической биотехнологии являются биоремедиация нефтезагрязненных территорий и очистка водоемов от нефти, в том числе с помощью применения различных минеральных сорбентов и биосорбентов [1, 2, 10–12]. Проведенные нами ранее лабораторные исследования также подтвердили, что биосорбционный метод очистки позволяет не только собрать нефть и нефтепродукты с водной поверхности или почвы, но и с помощью иммобилизованных микроорганизмов провести их дальнейшую деструкцию [6, 13–15]. Для оценки работы биогеосорбента в натуральных условиях

были проведены опытно-промышленные испытания его биотехнологических свойств.

Целью данной работы была оценка технологий биоремедиации с применением биогеосорбента «Геолекс» в полевых экспериментах.

Объекты и методы исследования

Комплекс проведенных работ включал следующие биотехнологические продукты:

1. Биогеосорбент «Геолекс». Состав биогеосорбента «Геолекс»: клетки биопрепарата «Биотрин» — альго-бактериально-дрожжевого консорциума — бактерий *Pseudomonas yamanorum* VKM В-3033D, дрожжей *Rhodotorula glutinis* VKM Y-2998D, микроводорослей *Chlorella vulgaris* Beijer. f. *globosa* IPPAS C-2024, иммобилизованного на глауконитсодержащем песке

Для цитирования: Щемелинина Т. Н., Анчугова Е. М., Котова О. Б. Биогеосорбент «Геолекс»: внедрение технологий в практику // Вестник геонаук. 2022. 4(328). С. 51–56. DOI: 10.19110/geov.2022.4.3.

For citation: Shchemelinina T. N., Anchugova E. M., Kotova O. B. The Geolex Biogeosorbent: practical application of technologies. Vestnik of Geosciences, 2022, 4(328), pp. 51–56, doi: 10.19110/geov.2022.4.3.

Бондарского месторождения Тамбовской области (рис. 1, табл. 1, 2) [5].

2. Кородревшая смесь — хорошо разложенные органические остатки со следующими свойствами: рН(вод.) — 8.15; рН(сол.) — 7.56; массовая доля азота общего — 6300 мг/кг; значения массовой доли подвижных соединений фосфора (в пересчете на P_2O_5) — 7000 мг/кг, калия (в пересчете на K_2O) — 1030 мг/кг, Mg — 3500 мг/кг, Ca — 130 000 мг/кг.

3. Материалы, необходимые для проведения технологии биоремедиации (минеральные удобрения NPK, семена трав).

4. Загрязненные почвы, грунты.

Опытно-промышленные испытания (ОПИ) технологий с применением биогеосорбента «Геолекс» (табл. 3)

1. На территории Ямало-Ненецкого автономного округа в районе кранового узла на 76-м км трассы Новый Уренгой — Сургут был поставлен эксперимент на площадках размером (1 × 1 м). Почва (торф) была загрязнена нефтепродуктом — газолином (до 20 г/кг). В начале эксперимента с каждого участка была отобрана проба почвы (контроль). В почву экспериментальных участков были внесены минеральные удобрения ($N_{14}P_{14}K_{14}$) в количестве 12 г и биогеосорбент

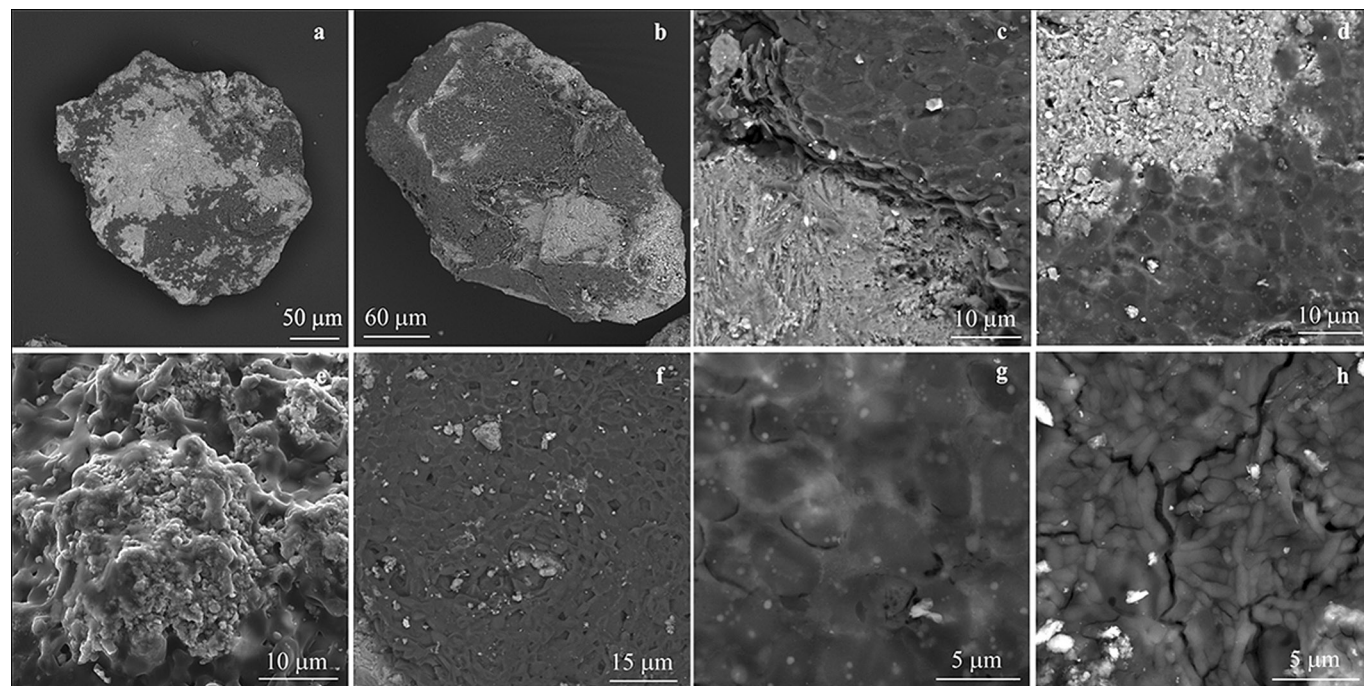


Рис. 1. СЭМ-изображения поверхности биогеосорбента (светлое — порода, темное — клетки консорциума), е — режим вторичных электронов, остальное — режим упругоотраженных электронов

Fig. 1. SEM images of the biogeosorbent surface (light — rock, dark — cells of the consortium), e — in secondary electron mode, the rest — in back scattered electron mode

Таблица 1. Химический состав глауконитсодержащего песка по данным рентгенофлуоресцентного анализа с учетом п. п. п., мас. %

Table 1. The chemical composition of the glauconite-bearing sand according to X-ray fluorescence analysis, considering ignition losses, wt. %

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ общ	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	п. п. п. LOI	Сумма Sum
73.98	0.33	9.19	5.96	0.01	1.10	1.76	3.56	0.43	0.31	3.37	100.00

Таблица 2. Удельная площадь поверхности и пористость минерального носителя с клетками биопрепарата «Биотрин»

Table 2. Specific surface area and porosity of the mineral carrier with Biotrin biopreparation cells immobilized

Условия Conditions	Удельная площадь поверхности, м ² /г Specific surface, area, m ² /g	Общий объем пор, см ³ /г Total pore volume, cm ³ /g	Объем мезопор, см ³ /г Mesopore volume, cm ³ /g	Объем микропор, см ³ /г Micropore volume, cm ³ /g
Без вакуумирования No vacuuming	2.02	0.0014	0.0006	0.001
С вакуумированием при 25 °С, 2 часа Vacuuming at 25 °C, 2 hours	1.97	0.0011	0.0006	0.001

**Таблица 3.** Условия и технологии опытно-промышленных испытаний биогеосорбента «Геолекс»**Table 3.** Conditions and technologies for pilot testing of the GEOLEX biogeosorbent

ОПИ Option	Характеристика пробы (тип почвы) Sample characterization (soil type)	Поллютант Pollutant type	Технологические материалы Process materials
ОПИ-1	торф peat	газолин gasoline	биогеосорбент «Геолекс» минеральные удобрения семена трав-рекультивантов GEOLEX Biogeosorbent mineral fertilizers seeds of herbs to promote revegetation
ОПИ-2	торф peat	нефть oil	биогеосорбент «Геолекс» минеральные удобрения семена трав-рекультивантов GEOLEX Biogeosorbent mineral fertilizers seeds of herbs to promote revegetation
ОПИ-3	насыпной грунт из песчано-гравийной смеси sand-gravel bulk soil	керосин kerosene	биогеосорбент «Геолекс» минеральные удобрения GEOLEX Biogeosorbent mineral fertilizers
ОПИ-4	насыпной грунт — тяжелый суглинок loamy-textured bulk soil	нефть oil	биогеосорбент «Геолекс» минеральные удобрения кородревесная смесь семена трав-рекультивантов GEOLEX Biogeosorbent mineral fertilizers bark-wood mixture seeds of herbs to promote revegetation

«Геолекс» в количестве 20 г. Почву перекопали на штык лопаты. Эксперимент был поставлен в трех повторностях. Пробы почвы отбирали до внесения биогеосорбента и спустя 60 суток после начала эксперимента. Обозначение участка эксперимента: ОПИ-1.

2. На территории Ханты-Мансийского автономного округа в районе трассы Лангепас — Покачи на загрязненной нефтью (до 6.6 г/кг) почве (торф) было разбито 3 участка 1 × 1 м в трех повторностях. В начале эксперимента с каждого участка была отобрана проба почвы (контроль). В емкостях (0.5 дм³) были разведены азотно-фосфорно-калийные удобрения (N₁₄P₁₄K₁₄) по 12 г и внесены в почву. Биогеосорбент «Геолекс» был внесен в почву участков в количестве 20 г. Почву перекопали на штык лопаты. Пробы почвы отбирали до внесения биогеосорбента и спустя 60 суток после начала эксперимента. Обозначение участка эксперимента: ОПИ-2.

3. На территории Республики Коми, в г. Сыктывкаре, в районе насосной подстанции предприятия АО «Комиавиатранс» был поставлен эксперимент на площадках размером 1 × 1 м. Почва (насыпной грунт из песчано-гравийной смеси) была загрязнена нефтепродуктом — керосином (до 32 г/кг). В почву экспериментальных участков были внесены минеральные удобрения (N₁₄P₁₄K₁₄) в количестве 2 г (растворялись в 1 дм³ воды) и биогеосорбент «Геолекс» в количестве 35 г (активировали в 1 дм³ воды). Почву перекопали на штык лопаты. Пробы почвы отбирали до внесения биогеосорбента и спустя 60 суток после начала эксперимента. Обозначение участка эксперимента: ОПИ-3.

4. На территории Республики Коми, в п. Ярега, в районе демонтированного резервуарного парка был поставлен эксперимент на площади участка 100 м². Почва (насыпной грунт — тяжелый суглинок) была загрязнена нефтью (до 11 г/кг). В почву эксперименталь-

ного участка были внесены кородревесная смесь (покрытие поверхности загрязненного участка не более 5 см), минеральные удобрения (N₁₄P₁₄K₁₄) в количестве 10 кг, активированный биогеосорбент «Геолекс» в количестве 10 кг, семена трав-рекультивантов (мятлик, овес, канареечник, клевер) в количестве 10 кг. До посева трав почву взрыхлили мотокультиватором. Пробы почвы отбирали до внесения биогеосорбента и спустя 60 суток после начала эксперимента. Обозначение участка эксперимента: ОПИ-4.

Содержание нефтепродуктов (НП) определяли гравиметрическим методом, РД 52.18.647-2003 в эко-аналитической лаборатории Института биологии Коми НЦ УрО РАН следующими этапами: извлечение НП из пробы путем их экстракции хлороформом; очистка экстракта методом колоночной хроматографии; определение массовой доли взвешиванием после упаривания очищенного экстракта пробы. Оборудование: весы лабораторные аналитические 1 класса точности XP205 Госреестр 30047-06, Швейцария, Mettler Toledo.

Для биохимических анализов за основу были взяты методы почвенной энзимологии [4]. Дегидрогеназную активность рассчитывали по оптической плотности. Оборудование: фотоколориметр КФК-3.

Результаты и обсуждение

Оценка функциональных свойств биогеосорбента «Геолекс»

Активность ферментов как индикатор биологической активности объекта можно применять в разных случаях. Так, например, для анализа различных функциональных показателей иммобилизованных клеток на сорбентах, таких как жизнеспособность, метаболическая и синтетическая активность, предлага-

ются методы, которые условно можно разделить на микробиологические, морфоцитохимические и биохимические [8].

Выбранный нами метод определения ферментативной активности является достаточно чувствительным, отражающим функциональное состояние микроорганизмов. Наиболее точный и нетрудоемкий способ определения жизнеспособности иммобилизованных клеток на сорбенте — это метод определения дегидрогеназной активности биогеосорбента.

Клетки микроорганизмов биогеосорбента «Геолекс» активировали путем замачивания в воде на 60 минут (вариант 1, 2), в вариантах 3–5 проводили измерение дегидрогеназной активности без активации (табл. 4).

Дегидрогеназная активность глауконитсодержащего песка без иммобилизации микроорганизмов была нулевой. Дегидрогеназная активность активированного биогеосорбента превышала таковую в неактивированном в 2.1–2.9 раза (табл. 4). Из этого следовало, что в технологиях рекультивации необходимо рекомендовать применение биогеосорбента, предварительно замоченного в воде, для ускорения процессов деструкции нефти и нефтепродуктов.

Таблица 4. Дегидрогеназная активность биогеосорбента «Геолекс», мг формазана/1 г а. с. п.

Table 4. The dehydrogenase activity of the GEOLEX biogeosorbent, mg of formazan per 1 g of totally-dried soil

Варианты Options	Дегидрогеназная активность Dehydrogenase activity
1	9.75 ± 0.22
2	8.57 ± 0.38
3	3.33 ± 0.11
4	3.39 ± 0.11
5	3.74 ± 0.13
Глауконитсодержащий песок Glauconite-bearing sand	0

Оценка технологий применения биогеосорбента «Геолекс»

Благодаря высоким сорбционным свойствам почвы нефтяные углеводороды способны аккумулироваться и сохраняться в ней длительное время, значительно ухудшая свойства почвы и ее биологическую активность. Нефть и нефтепродукты каждого региона имеют свой характерный состав, и эффект воздействия на почву будет зависеть от климатической зоны. Исходя из этого, очевидно, что и для рекультивации нефтезагрязненных объектов в каждом конкретном случае должен применяться индивидуальный подход. Условия и технологии опытно-промышленных испытаний биогеосорбента «Геолекс» представлены в таблице 3. Технология биорекультивации торфяной почвы, загрязненной газOLIном (ОПИ-1) и нефтью (ОПИ-2), была аналогична. В насыпной грунт из песчано-гравийной смеси, загрязненный керосином, не вносили травосмесь (ОПИ-3), а разрыхляли тяжелый суглинок, загрязненный нефтью (ОПИ-4), путем внесения кородревесной смеси с последующим применением биогеосорбента «Геолекс».

Точно предсказать результаты рекультивационных мероприятий и гарантировать успех восстановления почв в полной мере в настоящее время не представляется возможным, так как процессы, определяющие динамику токсичности нефтезагрязненных почв, изучены недостаточно. И в то же время показатели биологической активности позволяют с минимальными затратами оценить влияние поллютантов на плодородие почв.

Ранее проведенные в полевых условиях исследования показали возможность использования дегидрогеназы как наиболее чувствительного фермента, реагирующего на появление в почве поллютанта [3, 7, 9]. Внедренные биотехнологии усиливали процессы дегидрирования в загрязненных нефтью и нефтепродуктами участках за счет привнесения в почву микроорганизмов биогеосорбента, питательных элементов глауконитсодержащей породы, стимулирующих аборигенную микробиоту, аэрации почвы с помощью трав-рекультивантов и структуратора — кородревесной смеси (рис. 2). К концу эксперимента дегидрогеназная активность рекультивируемых почв снижалась, что свидетельствовало о восстановительном характере сукцессии.

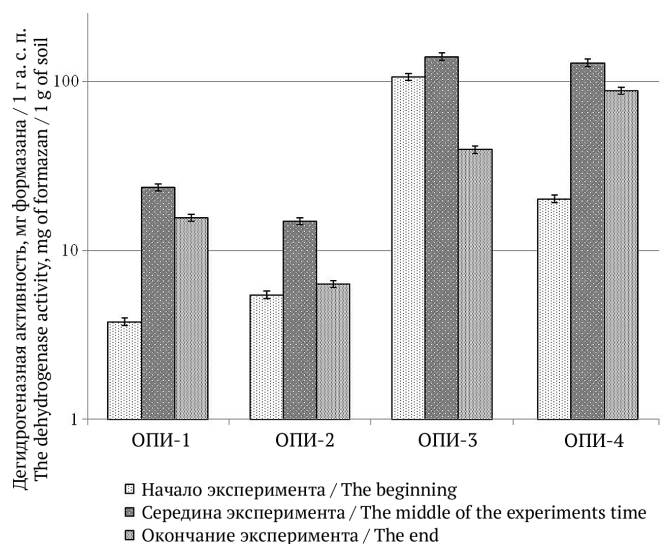


Рис. 2. Дегидрогеназная активность почвы до и после проведения опытно-промышленных испытаний технологий

Fig. 2. The soil dehydrogenase activity before and after pilot testing of technologies

Начальная концентрация нефти и нефтепродуктов в почве рекультивируемых участков была разной. Наиболее загрязненным участком была территория в районе насосной подстанции предприятия АО «Комиавиатранс» Республики Коми в г. Сыктывкаре (ОПИ-3) (рис. 3). К концу эксперимента содержание поллютанта в почвах участков ОПИ-2, ОПИ-4 снизилось до уровня допустимого остаточного содержания нефти в почве.

Эффективность примененных технологий очистки от нефти и нефтепродуктов была высокой в почве участков ОПИ-2 — ОПИ-4 (табл. 5) и невысокой в почве участка в районе кранового узла на 76-м км трас-

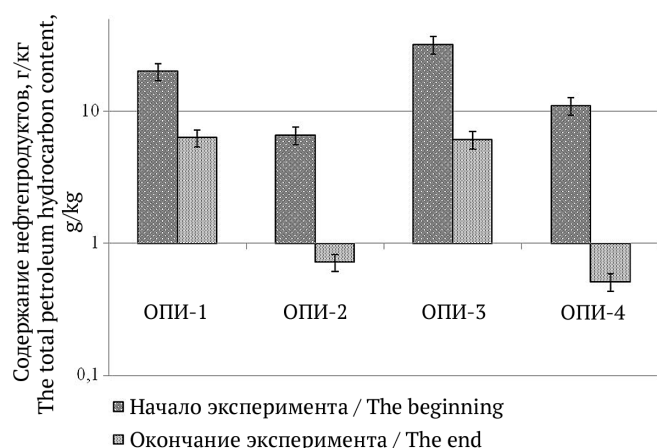


Рис. 3. Содержание нефтепродуктов в почве до и после проведения опытно-промышленных испытаний технологий

Fig. 3. The total petroleum content in the soil before and after pilot testing of technologies

сы Новый Уренгой — Сургут на территории Ямало-Ненецкого автономного округа, что говорило о токсичности газа и, как следствие, о необходимости проведения на этом участке дополнительных биорекультивационных мероприятий: внесения кородревесной смеси, увеличения количества вносимого биогеосорбента.

Таблица 5. Эффективность очистки почвы от нефти и нефтепродуктов, %

Table 5. The efficiency of soil cleanup, %

ОПИ Option	Эффективность очистки, % Efficiency of cleanup, %
1	68
2	89
3	81
4	95

Заключение

В результате иммобилизации на глауконитсодержащем песке клетки микроорганизмов, а также их разнообразные ферменты стабилизируются и длительное время сохраняют свою активность. Глауконитсодержащая порода является носителем пролонгированного действия, обеспечивая клеткам биопрепарата повышение терморезистентности, стрессоустойчивости. Перед применением биогеосорбента «Геолекс» в технологиях рекультивации необходима активация иммобилизованных на нем микроорганизмов.

Технологии рекультивации, проведенные на загрязненных участках с применением биогеосорбента «Геолекс», усиливали процессы дегидрирования и окисления нефти и нефтепродуктов. Эффективность очистки от загрязнителей на рекультивируемых опытно-промышленных участках составила 68–95 % за 60 суток.

Авторы выражают благодарность ЦКП «Геонаука» и экоаналитической лаборатории Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН за проведение количественного химического анализа.

Работа выполнена при финансировании ООО «БИОЭКОБАЛАНС», Государственного задания № 122040600019-1 «Научно-обоснованные биотехнологии для улучшения экологической обстановки и здоровья человека на Севере» и в рамках темы НИР «Развитие минерально-сырьевого комплекса Тимано-Североуральско-Баренцевоморского региона на основе эффективного прогноза, геологического моделирования, геолого-экономической оценки ресурсного потенциала и новых технологий переработки полезных ископаемых».

Литература

1. Васильева Г. К., Зиннатшина Л. В., Ахметов Л. И., Сушкова С. Н. Биорекультивация загрязненных углеводородами нефти почв с использованием метода сорбционной биоремедиации // Отходы, причины их образования и перспективы использования: Сб. науч. тр. по материалам междунар. науч. эколог. конф. 2019. С. 345–348.
2. Дегтярева И. А., Мотина Т. Ю., Бабынин Э. В., Ежкова А. М., Давлетшина А. Я. Эколого-токсикологическая оценка процесса биоремедиации нефтезагрязненной почвы // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 3. С. 196–202.
3. Мелехина Е. Н., Маркарова М. Ю., Щемелинина Т. Н., Анчугова Е. М., Канев В. В. Восстановительные сукцессии биоты в торфяной почве с нефтяным загрязнением при различных методах биологической рекультивации // Почвоведение. 2015. № 6. С. 740–750.
4. Хазиев Ф. Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с.
5. Щемелинина Т. Н., Котова О. Б., Хария М., Анчугова Е. М., Пеловский И., Кретеску И. Новые тренды в механизмах повышения производительности материалов на минеральной основе // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2017. № 6. С. 40–42.
6. Щемелинина Т. Н., Котова О. Б., Анчугова Е. М., Шушков Д. А., Игнатьев Г. В. Цеолитовое и глинистое сырье: экспериментальное моделирование биогеосорбентов // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2018. № 9. С. 50–57.
7. Щемелинина Т. Н., Новоселова Е. И., Киреева Н. А., Маркарова М. Ю. Диагностирование степени загрязненности почв нефтью по показателям ферментативной активности // Вестник Оренбургского государственного университета. 2007. № 75. С. 432–434.
8. Юрин В. М., Дитченко Т. И. Иммобилизованные клетки и ферменты: Учебно-методический комплекс. Минск: Белорусский государственный университет, 2014. 138 с.
9. Anchugova E. M., Melekhina E. N., Markarova M. Yu., Shchemelinina T. N. Approaches to the assessment of the efficiency of remediation of oil-polluted soils // Eurasian Soil Science. 2016. Vol. 49. No. 2. P. 234–237.
10. Gasimova A. S. Use of biological products based on natural zeolites and biohumus in cleansing contaminated soils Absheron peninsula // Sciences of Europe. Biological sciences. 9 (9). 2016. P. 3–6.
11. Ionela D., Fertu T., Gavrilescu M. Application of natural zeolites as sorbents in the clean-up of aqueous streams // Environmental Engineering and Management Journal. 2012. 11(4):867–878.
12. Kashefi, S., Lotfollahi, M. N., Shahrabadi, A. Investigation of asphaltene adsorption onto zeolite beta nanoparticles to reduce asphaltene deposition in a silica sand pack // Oil & Gas

Science and Technology — Rev. IFP Energies nouvelles. 2018. 73(2). DOI:10.2516/ogst/2017038

13. Shchemelinina T. N., Gömze L. A., Kotova O. B., Ibrahim J. E. F. M., Shushkov D. A., Harja M., Ignatiev G. V., Anchugova E. M. Clay- and zeolite-based biogeosorbents: modelling and properties // *Építőanyag — Journal of Silicate Based and Composite Materials*. 2019. Vol. 71. No. 4. P. 131–137. DOI:10.14382/epitoanyag-jsbcm.2019.23

14. Shchemelinina T. N., Anchugova E. M., Kotova O. B., Shushkov D. A. 2021. The analcime-bearing rock immobilized microalgae: Stress resistance, psychrotolerance, phenol removal // *Bioresource Technology*. 332, 124560. DOI:10.1016/j.biortech.2020.124560

15. Shchemelinina T. N., Kotova O. B., Anchugova E. M., Shushkov D. A., Ignatiev G. V. Zeolite and clay raw: experimental modeling of biogeosorbents // *Vestnik of Institute of Geology of Komi Science Center of Ural Branch RAS*. 2018. № 9 (285). C. 50–57.

References

1. Vasilyeva G. K., Zinnatshina L. V., Akhmetov L. I., Sushkova S. N. *Biorekultivatsiya zagryaznennykh uglevodorodami nefiti pochv s ispolzovaniyem metoda sorbtionnoy bioremediatsii. Otkhody, prichiny ikh obrazovaniya i perspektivy ispol'zovaniya* (Bioremediation of oil-contaminated soils using the method of sorption bioremediation. Wastes, causes of their formation and prospects for use). Collection of scientific papers based on the materials of the International Scientific Ecological Conference, 2019, pp. 345–348.

2. Degtyareva I. A., Motina T. Yu., Babynin E. V., Ezhkova A. M., Davletshina A. Ya. *Ekologo-toksikologicheskaya otsenka protsessy bioremediatsii neftezagryaznennoy pochvy* (Ecological and toxicological assessment of the process of bioremediation of oil-contaminated soil). *Theoretical and applied ecology*, 2020, No. 3, pp. 196–202.

3. Melekhina E. N., Markarova M. Yu., Shchemelinina T. N., Anchugova E. M., Kanev V. V. Secondary successions of biota in oil-polluted peat soil upon different biological remediation methods. *Eurasian Soil Sci.*, 2015, 48, pp. 643–653.

4. Khaziev F. Kh. *Metody pochvennoy enzimologii* (Methods of soil enzymology). Moscow: Nauka, 2005, 252 p.

5. Shchemelinina T. N., Kotova O. B., Kharia M., Anchugova E. M., Pelovskiy I., Cretescu I. *Novyye trendy v mekhanizmkh povysheniya proizvoditel'nosti materialov na mineral'noy osnove* (New trends in the mechanisms of increasing the productivity of mineral-based materials). *Vestnik IG Komi SC UB RAS*, 2017, No. 6, pp. 40–42.

6. Shchemelinina T. N., Kotova O. B., Anchugova E. M., Shushkov D. A., Ignatiev G. V. *Tseolitovoye i glinistoye syrye: eksperimentalnoye modelirovaniye biogeosorbentov* (Zeolite and clay raw materials: experimental modeling of biogeosorbents). *Vestnik of IG Komi SC UB RAS*, 2018, No. 9, pp. 50–57.

7. Shchemelinina T. N., Novoselova E. I., Kireeva N. A., Markarova M. Yu. *Diagnostirovaniye stepeni zagryaznennosti pochv neftyu po pokazatelyam fermentativnoy aktivnosti* (Diagnosing the degree of soil contamination with oil in terms of enzymatic activity). *Bulletin of the Orenburg State University*, 2007, No. 75, pp. 432–434.

8. Yurin V. M., Ditchenko T. I. *Immobilizovannyye kletki i fermenty. Uchebno-metodicheskiy kompleks* (Immobilized cells and enzymes. Training and methodology complex). Belarusian State University, 2014, 138 p.

9. Anchugova E. M., Melekhina E. N., Markarova M. Yu., Shchemelinina T. N. Approaches to the assessment of the efficiency of remediation of oil-polluted soils. *Eurasian Soil Science*, 2016, V. 49, No. 2, pp. 234–237.

10. Gasimova A. S. Use of biological products based on natural zeolites and biohumus in cleansing contaminated soils Absheron peninsula. *Sciences of Europe. Biological sciences*, 9 (9), 2016, pp. 3–6.

11. Ionela D., Fertu T., Gavrilescu M. Application of natural zeolites as sorbents in the clean-up of aqueous streams. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2012, No. 11(4), pp. 867–878.

12. Kashefi, S., Lotfollahi, M. N., Shahrabadi, A. Investigation of asphaltene adsorption onto zeolite beta nanoparticles to reduce asphaltene deposition in a silica sand pack. *Oil & Gas Science and Technology — Rev. IFP Energies Nouvelles*, 2018, 73(2), DOI:10.2516/ogst/2017038

13. Shchemelinina T. N., Gömze L. A., Kotova O. B., Ibrahim J. E. F. M., Shushkov D. A., Harja M., Ignatiev G. V., Anchugova E. M. Clay- and zeolite-based biogeosorbents: modelling and properties. *Építőanyag — Journal of Silicate Based and Composite Materials*, 2019, 71 (4), pp. 131–137. DOI:10.14382/epitoanyag-jsbcm.2019.23

14. Shchemelinina T. N., Anchugova E. M., Kotova O. B., Shushkov D. A. The analcime-bearing rock immobilized microalgae: Stress resistance, psychrotolerance, phenol removal. *Bioresource Technology*, 2021, 332, 124560. DOI:10.1016/j.biortech.2020.124560

15. Shchemelinina T. N., Kotova O. B., Anchugova E. M., Shushkov D. A., Ignatiev G. V. Zeolite and clay raw: experimental modeling of biogeosorbents. *Vestnik of Institute of Geology of Komi SC UB RAS*, 2018, No. 9 (285), pp. 50–57.

Поступила в редакцию / Received 24.03.2022