

Песчаные отложения Тажеранской степи как геоэкологический барьер от проникновения маслянистых загрязнителей

А. А. Яковлева*, Э. А. Силушкина

*Иркутский научно-исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия;
e-mail: ayakovistu@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5747-2864>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
25.06.2024;

получена
после доработки
19.10.2024;

принята
к публикации
25.10.2024

Ключевые слова:

песок, песчаные
отложения,
минеральный состав,
адсорбция,
поглощение,
фильтрация,
нефтепродукты,
Тажеранская степь

Тажеранская степь является уникальным географическим объектом юго-западного Прибайкалья. Эксперименты по исследованию механизмов поверхностных явлений в системе "песок – техногенный сток" проведены с использованием искусственно созданных техногенных стоков, имитирующих ситуацию локального разлива нефтепродуктов. Для определения концентраций нефтепродуктов использовался флуориметрический метод анализа. Рентгеноструктурные исследования выявили в минеральном составе песчаных отложений присутствие α -кварца (36,4 %), альбита, микроклина, кальцита, амфибола, вермикулита и др. Для идентификации функциональных групп на поверхности зерен применялась ИК-Фурье-спектрометрия. Ситовый анализ показал соизмеримые количества всех фракций стандартного набора сит. В ходе исследования установлено, что степень удерживания маслянистых пленок из водных композиций зависит от зернистости песка, его однородности и кристаллохимических особенностей. Песчаные отложения Тажеранской степи имеют достаточно высокую удерживающую способность; 0,08-метровый слой удерживает 80–90 мас.% бензиновых фракций из водных эмульсий. Песчаные отложения выполняют функцию природного барьера от проникновения маслянистых загрязнителей в нижележащие слои. Состояние приповерхностного почвенного слоя оказывается весьма уязвимым, нефтяные пленки представляют угрозу уникальному биологическому разнообразию фауны. Полученные результаты показывают важную роль песчаных отложений как индикатора состояния окружающей среды, ее способности к самосохранению и свидетельствуют о необходимости тестирования песчаных отложений при проведении постоянного мониторинга уровня загрязненности Тажеранской степи.

Для цитирования

Яковлева А. А. и др. Песчаные отложения Тажеранской степи как геоэкологический барьер от проникновения маслянистых загрязнителей. Вестник МГТУ. 2025. Т. 28, № 1. С. 71–80. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-1-71-80>.

Sandy deposits of the Tazheran steppe as a geoecological barrier against penetration of oily pollutants

Ariadna A. Yakovleva*, Ella A. Silushkina

*Irkutsk Scientific Research Technical University, Irkutsk, Russia;
e-mail: ayakovistu@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5747-2864>

Article info

Received
25.06.2024;

received
in revised
19.10.2024;

accepted
25.10.2024

Key words:

sand, sandy deposits,
mineral composition,
adsorption,
absorption capacity,
filtering,
petroleum products,
Tazheran steppe

Abstract

The Tazheran steppe is a unique geographical object of the southwestern Baikal region. Experiments to study the mechanisms of surface phenomena in the "sand – technogenic runoff" system have been carried out using artificially created technogenic runoff simulating a local oil spill. Fluorimetric analysis has been used to determine the concentrations of oil products. X-ray diffraction studies have revealed the presence of α -quartz (36.4 %), albite, microcline, calcite, amphibole, vermiculite, etc. in the mineral composition of sand deposits. IR Fourier spectrometry has been used to identify the functional groups on the grain surface. Sieve analysis has shown comparable amounts of all fractions of a standard set of sieves. The study has found that the degree of retention of oily films from aqueous compositions depends on the granularity of the sand, its homogeneity and crystallochemical properties. Sand deposits of the Tazheran steppe have a fairly high retention capacity; the 0.08-meter layer retains 80–90 wt.% of gasoline fractions from water emulsions. Sand deposits act as a natural barrier against the penetration of oily pollutants into the underlying layers. The condition of the near-surface soil layer is very vulnerable, oil films pose a threat to the unique biological diversity of the fauna. The results obtained show the important role of sand deposits as an indicator of the state of the environment, its ability to self-preserve, and testify to the need to test sand deposits during continuous monitoring of the pollution level of the Tazheran steppe.

For citation

Yakovleva, A. A. et al. 2025. Sandy deposits of the Tazheran steppe as a geoecological barrier against penetration of oily pollutants. *Vestnik of MSTU*, 28(1), pp. 71–80. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-1-71-80>.

Введение

Разнообразная деятельность человека оказывает значительное влияние на экологическое состояние окружающей среды. В особом положении оказываются территории, где промышленная деятельность не ведется; они становятся все более привлекательными для обустройства мест отдыха. В Иркутской области такой территорией является Тажеранская степь, расположенная в Прибайкальском национальном парке (Гребенщикова и др., 2008; Мусихин, 2014; Филиппов, 1989). Многочисленные туристы знакомятся с удобными байкальскими бухтами, необычными пейзажами данной местности. Территория Тажеранской степи – уникальный природный комплекс, поэтому здесь проходят производственную практику студенты различных учебных заведений (геологи, биологи, экологи и др.). Тажеранская степь, как сакральная местность, привлекает этнографов.

Антропогенная нагрузка этой территории связана с автомобильным движением (тысячи туристов, стремящихся к комфортному отдыху, приезжают на автомобилях) (Сергачева и др., 2020; Панкеева, 2014; Храмова и др., 2021; Слепнева и др., 2019). Через степь проходит асфальтированная дорога; свернув с нее, автомобилист оказывается на пересеченной местности, поэтому на территории степи множество стихийно сложившихся автодорог (рис. 1).



Рис. 1. Дороги в Приольхонье¹

Fig. 1. Priolkhonye roads

По мнению ученых, появление данных дорог приводит к уничтожению уникального растительного покрова и нарушает природное равновесие степи (Белых, 2024). На наш взгляд, процесс изучения экологического состояния Тажеранской степи не должен включать только анализ механического нарушения ландшафта и деградации земли (Яковлева и др., 2018). Актуальны и своевременны исследования способности песчаных отложений, расположенных в верхнем горизонте почвы, поглощать и задерживать всевозможные загрязнители, которые попадают в грунтовые и поверхностные воды (Яковлева и др., 2020). Особого внимания требует изучение сорбционных характеристик местных песчаных отложений по отношению к таким нефтепродуктам, как бензин и моторное смазочное масло (МСМ), поскольку источниками загрязнения почв нефтепродуктами являются именно автомобили.

Целью работы было изучение свойств песчаных отложений Тажеранской степи с точки зрения их способности выступать в роли геоэкологических барьеров и противостоять антропогенным воздействиям. Представленные результаты анализа ситуации загрязнения почвенного покрова нефтепродуктами (автомобильным бензином и моторным смазочным маслом) важны при исследовании общего комплекса

¹ Яндекс Карты. URL: <https://yandex.ru/maps/>.

вопросов по оценке значения песков в обеспечении способности экосистемы Тажеран к самовосстановлению и сохранению стабильного состояния.

Для достижения цели проведено коллоидно-химическое исследование образцов песка в условиях, которые воспроизводят реально возможную ситуацию локального разлива нефтепродуктов, используемых при эксплуатации большинства автомобилей. Опыты проведены в лабораторных условиях на основе имитационного моделирования с использованием искусственно созданных техногенных стоков.

При попадании нефтепродуктов происходит внедрение большого количества химических веществ на поверхность минеральных частиц почвенного покрова, поскольку в состав коммерческих продуктов входят не только углеводороды, но и различные добавки (Салангина, 2003). Токсичный эффект нефтепродуктов связан с присутствием летучих низкомолекулярных углеводородов, однако фракции смазочного масла с более низкой температурой кипения не менее опасны, т. е. все компоненты нефтепродуктов отрицательно влияют на окружающую среду (Gennadiev et al., 2007). Они приводят к увеличению плотности почвенного покрова, снижению пористости и росту гидрофобности структур, затрудняющих стекание воды на нижние горизонты и способствующих образованию луж с маслянистой пленкой на поверхности. Поверхность частиц песка становится липкой, на ней образуется толстая корка из смеси песчано-глинистых частиц и составляющих нефтепродуктов. Изменения физико-механических свойств почвы негативно сказываются на природных процессах (нарушается водный баланс, изменяются механизмы жизненно важного массопереноса); деградация приводит к подавлению и угнетению растительных сообществ (Химия..., 1982; Зверева и др., 2023; 2019; Нестерова и др., 2017; Максимович, 2011; Никашина, 2019).

Материалы и методы

Способность песков удерживать маслянистые включения нефтепродуктов рассматривалась как их природное свойство. На первом этапе исследования на территории Тажеранской степи выбрана площадка размером около $50 \times 100 \text{ м}^2$ вблизи пещеры Хурганская, являющейся охраняемым объектом археологического наследия федерального значения и часто посещаемой туристами. Почвенный покров площадки практически ровного микрорельефа не отличается разнообразием и представлен преимущественно песчаными и глинистыми участками, перемежающимися камнями и супесями. Пробы песка отобраны со свободных от растительности мест (четыре пробы массой 100–150 г).

На втором этапе в лаборатории при подготовке образцов к коллоидно-химическим исследованиям проведена очистка исходных песков от несвойственных и нетипичных включений. Для оценивания природной нефтеемкости песков специальная обработка образцов перед исследованиями не проводилась. После очистки осуществлены высушивание и квартование представительной пробы, а затем – ситовый анализ и исследование значимых качеств и свойств (Яковлева и др., 2021).

Ситовый анализ проб песка по ГОСТ 12536-79² проведен с целью определения его гранулометрического состава. При просеивании использовали стандартный набор из шести сит при взвешивании остающегося материала на каждом сите. Для удобства представления результатов в дальнейшем были введены номера и обозначения фракций со средними размерами 0,1875; 0,375; 0,75; 1,5 мм. Характеристика фазового состава и минеральных особенностей образцов, полученная с помощью РФА³, качественно и количественно идентична для всех проб песка, т. е. геохимический состав объектов исследования одинаков (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что в состав песка входят различные минералы (α -кварц, кальцит, амфиболы и другие минералы), содержание которых составляет около 20 %.

Для идентификации функциональных групп на поверхности зерен песка использовали ИК-Фурье-спектроскопию. Поскольку за счет компонентов нефти в исследуемой системе происходит увеличение концентрации органических веществ в пересчете на общий углерод, изменяются характеристики спектров, что указывает на наличие маслянистых пленок на поверхности.

В работе использовали бензин АИ-92 (ГОСТ 32513-2013⁴) и моторное смазочное масло Pure Polaris Demand drive plus (Швейцария).

Водные эмульсии бензина АИ-92 и МСМ были приготовлены посредством смешивания $1 \cdot 10^{-3} \text{ дм}^3$ коммерческого продукта в $0,5 \text{ дм}^3$ дистиллированной воды в делительной воронке при сильном и длительном встряхивании с последующей экстракцией. В опытах использовали фракцию из нижней части просеянного песка.

Нефтеобменную способность песка изучали при комнатной температуре. Для этого в фильтровальную колонку диаметром 1 см со специально откалиброванным регулирующим устройством в нижней части

² ГОСТ 12536-79. Межгосударственный стандарт. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. Введен 07.01.1980. URL: <https://docs.cntd.ru/document/871001091>.

³ РФА – рентгенофлуоресцентный анализ.

⁴ ГОСТ 32513-2013. Межгосударственный стандарт. Топлива моторные. Бензин неэтилированный. Технические условия. Введен 01.01.2015. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200108179>.

помещали слой песка (высоту его во всех опытах контролировали) и пропускали через него 25 см³ исследуемой эмульсии нефтепродукта. Прошедшую через слой песка жидкость (сток) собирали, определяли ее объем и концентрацию. Для определения эффективности удаления углеводородов из раствора колонкой фильтрации R использовали формулу

$$R = \frac{c_0 - c_k}{c_0} 100 \%,$$

где c_0 и c_k – начальная и конечная (в стоке после пропускания через слой песка) концентрации раствора, мг/дм³.

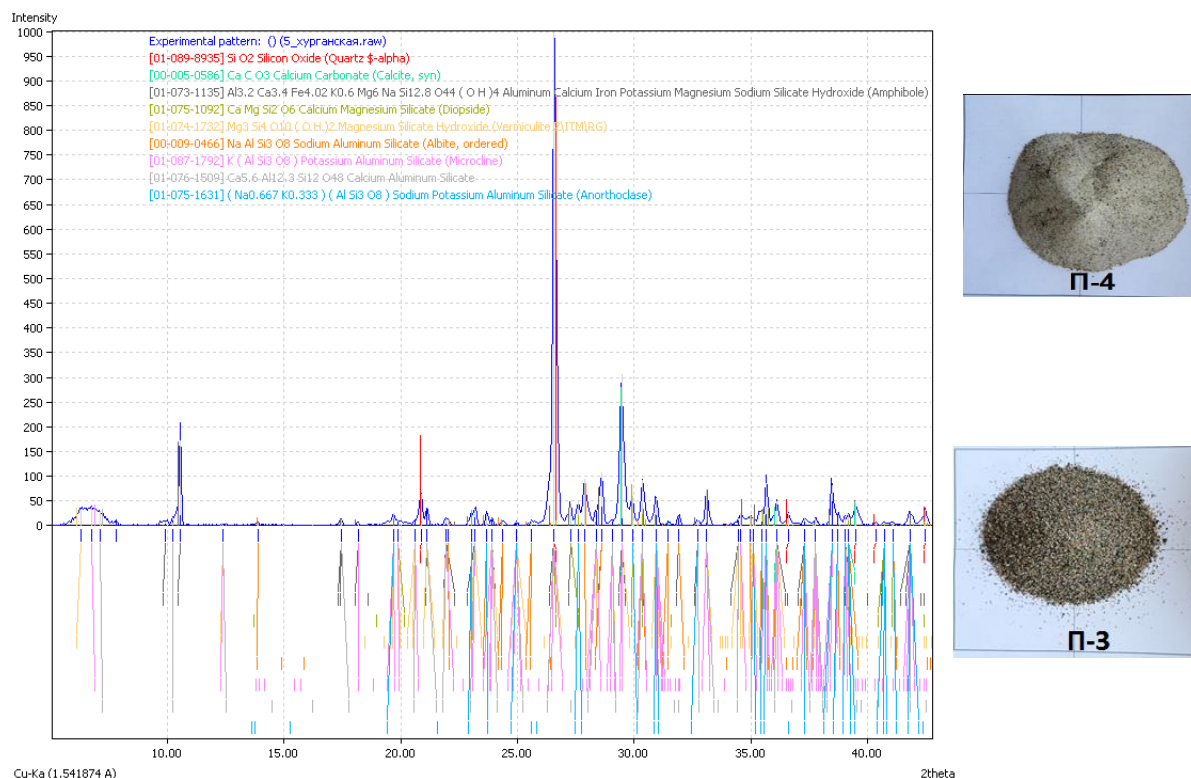


Рис. 2. Дифрактограмма и фото образцов песка
Fig. 2. Diffractogram and photos of sand samples

Десорбцию проводили многократным промыванием песка с активным встряхиванием и неоднократным пропусканием через слой сорбента в колонке при использовании 0,025 дм³ дистиллированной воды и контроле концентрации фильтрата.

Концентрацию эмульсии нефтепродуктов определяли флуориметрическим методом по ПНД Ф 14.1.2:4.128-98⁵ на анализаторе "Флюорат 02-5М". Для градуировки шкалы анализатора из стандартного раствора бензина/МСМ в гексане концентрацией 100 мг/дм³ были приготовлены градуировочные растворы с массовыми концентрациями нефтепродуктов от 5 до 40 мг/дм³.

Для обработки результатов исследования использовали стандартную программу Microsoft Office Excel.

Результаты и обсуждение

В исследуемых пробах в соизмеримых количествах имеются фракции с четырех средних сит набора; в крайних ситах песка оказалось немного, что говорит о его относительной однородности. Две крупные фракции (от 0,5 мм и более) содержат 57 % песка, две более мелкие включают остальное количество песка. Таким образом, по общепринятой классификации исследуемые образцы характеризуются как смесь крупной, средней и мелкой песчаных фракций, что учитывали при планировании экспериментов и анализе результатов; образцы каждой фракции рассматривали отдельно.

⁵ ПНД Ф 14.1.2:4.128-98. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах природных, питьевых, сточных вод флуориметрическим методом на анализаторе жидкости "Флюорат-02" (М 01-05-2012). Введен 01.01.2018. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293770/4293770987.pdf>.

Степень удерживания бензиновых пленок фракциями разных размеров одного из образцов песка представлена на рис. 3. Подобных кривых удерживания эмульсий бензина и моторного масла получено большое количество, что позволило из значительного массива данных установить общие закономерности.

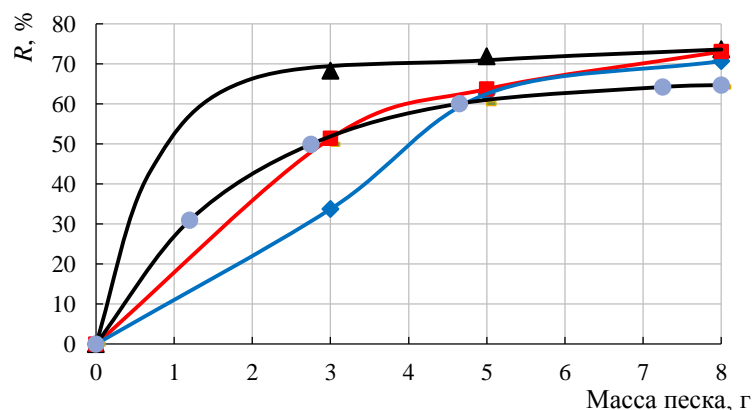


Рис. 3. Удерживание бензина образцами песка со средними размерами частиц: ▲ – 0,1825; ● – 0,375; ■ – 0,75; ◆ – 1,5 мм
Fig. 3. Retention of gasoline by medium-sized sand samples: ▲ – 0.1825 mm; ● – 0.375 mm; ■ – 0.75 mm; ◆ – 1.5 mm

Для всех фракций песка эффективность удерживания бензина закономерно увеличивается с увеличением массы навесок (с высотой слоя) в фильтровальной колонке. На начальных участках некоторых изотерм степень удерживания имеет меньшие значения, но со временем все кривые выходят на некоторый завершающий участок, причем сходятся практически в одной точке. Вид изотерм показывает, что свойства поверхности минеральных частиц не располагают к росту толщины пленок на поверхности; такой вид характерен для мономолекулярного механизма заполнения твердой поверхности, когда важны энергетические свойства центров адсорбции. Присутствие следов углеводов в фильтрате подтверждает ограниченность удерживания пленок и фрагментов на поверхности песчаных частиц. Предельные показатели по количеству бензина, удерживаемого слоем песка, и количество углеводов в стоке свидетельствуют о неспособности песков полностью удерживать нефтепродукты. Анализируя механизм поверхностного процесса, можно предположить, что диполь-дипольное взаимодействие, как составляющая часть сил Ван-дер-Ваальса, практически отсутствует. Входящим в состав бензина низкомолекулярным углеводородам присуща низкая поляризуемость молекул. На поверхности зерен песка возникают неоднородные по полярности контакты, в которых доминируют диполи воды. Эмульсии моторного масла содержат более сложные по строению углеводороды; при этом значимость имеют специфические взаимодействия π -электронов ароматических колец с активными центрами поверхности песков. На наш взгляд, именно такие взаимодействия вносят весомый вклад в механизм процессов, происходящих на поверхности частиц песка в присутствии маслянистых нефтепродуктов.

Это взаимодействие находит отражение в значениях эффективных констант Гамакера, имеющих для твердых фракций нефти в среде толуола и гексана на порядок меньшие значения по сравнению с константами Гамакера для кварца и корунда в среде воды, которые составляют $3,3 \cdot 10^{-20}$ и $(0,5 \div 1,1) \cdot 10^{-20}$ Дж соответственно (Ролдугин, 2011; Клындюк, 2011).

При небольшом слое сорбента низкие значения степени удерживания у образца крупного песка, на наш взгляд, связаны с тем, что между частицами образуются каналы, по которым поток жидкости быстро перемещается вниз, лишь незначительно задерживаясь на поверхности. Со снижением размера зерен при формировании порового пространства упаковка частиц оказывается более плотной, присутствие каналов с вертикальной ориентацией исключено. Высокая однородность и равномерная зернистость песка изменяют режим прохождения жидкости, при котором длительность контакта обеспечивает углеводородным пленкам возможность прочнее закрепиться на мелких частицах.

Увеличение высоты слоя фильтрующего материала приводит к частичной утрате доминирования геометрических параметров межзеренного пространства, расположение частиц даже более крупных размеров исключает полые каналы в упаковке. Выход на предельные значения эффективности (65–70 %), одинаковые для всех фракций песка, на наш взгляд, связан с кристаллохимическим составом песка. Долгосрочное тестирование песка через определенные промежутки времени позволит определить его способность удерживать маслянистые пленки и служить защитным барьером для нижних слоев. Натурные измерения показали, что толщина слоя песчаных отложений на многих участках Тажеранской степи составляет от 5 до 8 см. Нижележащие слои почвы со своими свойствами и функциями оказываются гарантированно защищенными от загрязнений, нефтяных пленок и разливов.

Кристаллохимический состав минерального сорбента всегда влияет на механизм сорбции (Яковец и др., 2013; Мязин и др., 2024; Баннова и др., 2012; Юрмазова и др., 2018; Дударев и др., 2024). Например, при неодинаковом отношении радиусов катионов алюминия и кремния и аниона кислорода, составляющих 0,415 и 0,387 нм соответственно (Юрмазова и др., 2018), существенно различаются константы Гамакера оксидов по отношению к воде (Диаграммы..., 1985; Бацанов, 2000). Это влечет различие в энергии адгезионного взаимодействия и, как следствие, изменение удерживающей способности песка в условиях резкого гидрофильно-гидрофобного дисбаланса.

Исследуемые пески имеют уникальный состав минералов (рис. 2), характерный для данной местности. Кроме α -кварца (36,4 мас.%), кальцита и амфиболов, пески содержат силикаты щелочных и щелочно-земельных металлов (альбит, микроклин), вермикулит, диопсид, некоторые минералы присутствуют в количествах, составляющих менее 1 мас.%. Все минералы имеют различную кристаллическую структуру (ленточную, слоистую или пластинчатую), что важно для формирования и удерживания пленок и фрагментов нефтепродуктов на поверхности контактных площадок.

Совокупность факторов, определяющих специфику фазовых контактов (зернистость, гранулометрическая и кристаллохимическая неоднородность), свидетельствует о том, что пески по способности защищать нижележащие слои от проникновения нефтепродуктов различны. Кроме эффективности удаления углеводородов, показательно их содержание в стоках после фильтрации. В ходе исследования рассмотрена зависимость концентрации стоков от начальной концентрации имитатора-загрязнителя и скорости его пропускания, гранулометрического состава песка, высоты фильтрующего слоя, а при десорбции – еще и количества промываний. При этом кристаллохимический состав считался обобщенной характеристикой всех используемых образцов. На рис. 4 и 5 показано, какая часть бензина и моторного масла оказывается в стоках после фильтрации, если исходная концентрация имитатора-загрязнителя составляет 1 %, а скорость его пропускания равна 0,5 см³/мин.



Рис. 4. Содержание бензиновых фрагментов в стоках через слои песка толщиной 2,5–3 см (1), 5 см (2), 8 см (3)
 Fig. 4. The content of gasoline fragments in drains through layers of sand with a thickness of: 1 – 2.5–3 sm; 2 – 5 sm; 3 – 8 sm

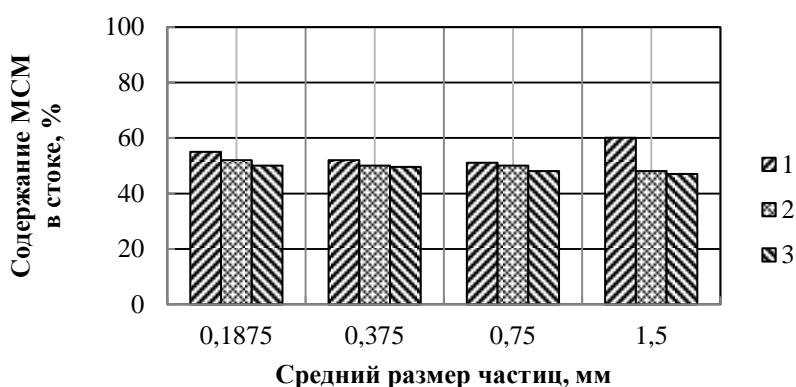


Рис. 5. Содержание фрагментов моторного масла в стоках через слои песка толщиной 2,5–3 см (1), 5 см (2), 8 см (3)
 Fig. 5. The content of fragments of engine oil in drains through layers of sand with a thickness of: 1 – 2.5–3 sm; 2 – 5 sm; 3 – 8 sm

Видно, что для всех песков увеличение высоты фильтрующего слоя приводит к закономерному снижению содержания углеводов в стоках. Двукратное увеличение скорости пропускания имитатора-загрязнителя приводит к росту следов нефтепродуктов в стоках. Если фильтрацию в условиях экспериментов ассоциировать с таким неконтролируемыми природными явлениями, как дождь или таяние снега, то на них можно распространить полученные результаты и использовать для количественных оценок реальных процессов.

Результаты десорбции показывают, как и какое количество нефтепродуктов удерживается песками. Неоднократное промывание песков из фильтровальных колонок свидетельствует о том, что даже после 7–8 промываний в стоках присутствуют следы нефтепродуктов (бензина и моторного масла). Очевидно, это связано с поверхностными особенностями нативных кристаллов, имеющих всевозможные дефекты структуры. Маслянистые включения нефтепродуктов могут сколь угодно долго и прочно удерживаться на таких поверхностях. Как правило, в эффектах промывания обнаруживаются определенные закономерности, как и при формировании маслянистых пленок. Так, мелкозернистые пески лучше удерживают нефтепродукты, но отмываются от следов нефтепродуктов быстрее и полнее, при этом бензиновые составляющие удаляются легче, чем следы смазочного масла. Пески крупнее удерживают на поверхности меньшее количество масла, однако сохраняется оно и после многократных промываний.

Промывание песков не приводит к восстановлению исходных свойств песчаного материала, в системе остается достаточное количество нефтепродуктов. Это позволяет рассматривать пески как своеобразную тест-систему для оценивания состояния почвенного покрова. В проведенных экспериментах природные пески были разделены на отдельные части (фракционированы), которые проявляли сходные результаты, позволяющие предположить, что при обратном смешивании (другими словами, в своем первозданном виде) они будут демонстрировать те же логические соотношения. Процессы формирования пленок нефтепродуктов на природных песках, адгезионная устойчивость и физико-химические особенности поверхностных взаимодействий зависят от гидрофильно-липофильной мозаичности песка, размера его частиц и их однородности, величины контактной поверхности и времени контакта при различной скорости фильтрования.

Заключение

Удерживание пленок нефтепродуктов из эмульсий типа "вода – масло" зависит от кристаллохимических и гранулометрических свойств песков Тажеранской степи. Оно выше у мелкозернистых песков и идет на убыль с появлением в составе песка более крупных зерен и снижением однородности состава. При высоте слоя песка 8 см удерживание песками нефтяных фрагментов может достигать 85–90 %.

Степные пески вблизи пещеры Хурганская имеют достаточно высокую удерживающую способность в отношении нефтесодержащих эмульсий и могут выполнять функцию природного барьера от проникновения маслянистых загрязнителей в нижележащие слои. Вместе с тем после промывания на песках остается значительное количество загрязняющих веществ, т. е. восстановления исходных характеристик песков не происходит. Концентрирование загрязняющих веществ на поверхности песков способствует также созданию проблем и в этой части почвы. Не защищенными от поражения маслянистыми пленками и пятнами оказываются растения, насекомые, т. е. все то, что определяет уникальное биоразнообразие данной рекреационной зоны, особенно если происходят процессы постоянного воздействия (выветривание, механическое перемешивание под колесами автомашин, под ногами людей и т. п.). Таким образом, песчаные отложения можно считать удачными тест-объектами, пригодными для проведения экологического мониторинга.

Результаты исследований коллоидно-химических закономерностей поверхностных процессов подчеркивают важную роль песчаных отложений как индикатора состояния окружающей среды и ее способности к самовосстановлению и самосохранению и свидетельствуют о необходимости тестирования песчаных отложений при проведении постоянного мониторинга уровня загрязненности Тажеранской степи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Баннова Е. А., Залозная Е. П., Китаева Н. К., Мерков С. М. [и др.]. Очистка сточных вод от нефтепродуктов с помощью природных сорбентов // *Вода: химия и экология*. 2012. № 11(53). С. 73–78. EDN: PIJHTB.
- Бацанов С. С. Структурная химия. Факты и зависимости. М. : Диалог-МГУ, 2000. 291 с.
- Белых О. А. Сохранение биоразнообразия в Прибайкальском национальном парке при строительстве дорог // *XXI век. Техносферная безопасность*. 2024. Т. 9, № 1 (33). С. 8–18. DOI: <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2024-9-1-8-18>. EDN: IQOTJP.
- Гребенщикова В. И., Лустенберг Э. Е., Китаев Н. А., Ломоносов И. С. Геохимия окружающей среды Прибайкалья. Байкальский геоэкологический полигон. Новосибирск : ГЕО, 2008. 234 с.
- Диаграммы состояния систем тугоплавких оксидов : справочник. В 6 вып. Вып. 5. Двойные системы / отв. ред. Ф. Я. Галахов. Л. : Наука, 1985. 284 с.

- Дударев В. И., Минаева Л. А. Применение углеродных сорбентов для извлечения марганца из растворов // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2024. Т. 14, № 1(48). С. 35–40. DOI: <https://doi.org/10.21285/achb.897>. EDN: NNHBMP.
- Зверева Н. А., Белозерцева И. А. Рекреационная трансформация почв Восточного Приольхонья // Региональные геосистемы. 2023. Т. 47, № 2. С. 175–191. DOI: <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-2-175-191>. EDN: GFUTKD.
- Зверева Н. А., Лопатина Д. Н., Белозерцева И. А. Экологическое состояние почв Приольхонья в рекреационной зоне // Экология родного края: проблемы и пути их решения : материалы XIV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, г. Киров, 16–18 апреля 2019 г. Киров : ВятГУ, 2019. С. 169–172. EDN: ХТНАРК.
- Максимович Н. Г., Хайрулина Е. А. Геохимические барьеры и охрана окружающей среды. Пермь : Пермский гос. ун-т, 2011. 247 с.
- Мусихин М. А. Проблема рационального природопользования территорий (на примере озера Байкал) // Мониторинг. Наука и технологии. 2014. № 4(21). С. 41–50. EDN: TDXDAL.
- Мязин В. А., Шушков Д. А., Фокина Н. В., Чапоргина А. 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>. EDN: DDKRVR.
- Нестерова Л. А., Полякова С. Д. Загрязнение почв тяжелыми металлами как индикатор состояния природной среды Тажеранской степи // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. География. Геоэкология. 2017. № 2. С. 68–73. EDN: ZAEQQN.
- Никашина В. А. Проницаемые геохимические барьеры как способ защиты окружающей среды от загрязнений. Природные сорбенты для решения экологических задач. Математическое моделирование и расчет процессов. Обзор // Сорбционные и хроматографические процессы. 2019. Т. 19, № 3. С. 289–304. DOI: <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2019.19/746> EDN: OXEVRP.
- Панкеева Н. С. Воздействие туризма на природный комплекс Прибайкальского национального парка // Коммуникационные технологии: социально-экономические и информационные аспекты : материалы 2-й Междунар. студ. науч.-практ. конф., г. Иркутск, 15 апреля 2014 г. Иркутск : ЦентрНаучСервис, 2014. С. 133–137. EDN: SYVZIN.
- Ролдугин В. И. Физикохимия поверхности. Долгопрудный : Интеллект, 2011. 565 с.
- Салангинас Л. А. Изменение свойств почв под воздействием нефтезагрязнения и разработка системы мер по их реабилитации : дис. ... д-ра биол. наук : 06.01.03. Екатеринбург, 2003. 486 с.
- Сергачева Е. А., Игуменьева В. В. Исследование туристско-рекреационной зоны Прибайкальского национального парка // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2020. Т. 1, № 17. С. 243–250. DOI: <https://doi.org/10.36629/2686-7788-2020-1-243-250>. EDN: HNHGFQ.
- Слепнева Е. В., Дуля К. В. Перспективы создания туристско-рекреационного кластера "Туризм без границ" в Прибайкальском национальном парке // Известия Иркутского государственного университета. Сер. Науки о Земле. 2019. Т. 28. С. 89–107. DOI: <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.28.89>. EDN: SACRVA.
- Филиппов А. Геология пещер побережья озера Байкал // Proceedings of the 10th International Congress of Speleology, Budapest, 1989. Vol. 2. P. 583–585.
- Химия окружающей среды / под ред. Дж. О. М. Бокриса. М. : Химия, 1982. 671 с.
- Храмова А. И., Марков И. С. Анализ рекреационной зоны заповедного Прибайкалья для организации туристической деятельности // Динамика и взаимодействие геосфер Земли : материалы Всерос. конф. с междунар. участием, посвященной 100-летию подготовки в Томском гос. ун-те специалистов в обл. наук о Земле, 8–12 ноября 2021 г. : в 3 т. Томск : Изд-во Томского ЦНТИ, 2021. Т. 3. С. 194–198. EDN: GNMLCV.
- Юрмазова Т. А., Шахова Н. Б., Хоанг Ч. Т., Планкина М. В. Адсорбция нефтепродуктов и неорганических ионов на минеральном сорбенте // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 5. С. 125–134. EDN: XVXWPJ.
- Яковец Н. А., Опанасенко О. Н., Крутько Н. П. Модифицирование нефтяных смолисто-асфальтовых дисперсий оксиэтилированными поверхностно-активными веществами // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. 2013. № 2. С. 10–15. EDN: VKXRKX.
- Яковлева А. А., Гусева Е. А., До В. Т. Поглощительные свойства песков рекреационных зон юго-западного побережья Байкала по отношению к некоторым агентам // Биотехнология в интересах экологии и экономики Сибири и Дальнего Востока : материалы V Всерос. науч.-практ. конф., г. Улан-Удэ, 25–27 июня 2018 г. Улан-Удэ : Изд-во ВСГУТУ, 2018. С. 94–100. EDN: UZVDYQ.
- Яковлева А. А., Нгуен Ч. Т. Характеристика сорбционных процессов на поверхности речных песков с участием ионов железа (III) // Журнал физической химии. 2021. Т. 95, № 6. С. 933–938. DOI: <https://doi.org/10.31857/s0044453721060285>. EDN: OIAKMH.

- Яковлева А. А., Нгуен Ч. Т., До В. Т. Некоторые особенности барьерных качеств песков Юго-Западного Прибайкалья по отношению к типичным экологически агрессивным стокам // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2020. Т. 10, № 1. С. 159–168. DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-159-168>. EDN: XGFCLF.
- Gennadiev A. N., Pikovskii Yu. I. The maps of soil tolerance toward pollution with oil products and polycyclic aromatic hydrocarbons: Methodological aspects // Eurasian Soil Science. 2007. Vol. 40, Iss. 1. P. 70–81. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1064229307010115>.

References

- Bannova, E. A., Zaloznaya, E. P., Kitaeva, N. K., Merkov, S. M. et al. 2012. Purification of wastewater from oil products using natural sorbents. *Water: Chemistry and Ecology*, 11(53), pp. 73–78. EDN: PIJHTB. (In Russ.)
- Batcanov, S. S. 2000. Structural Chemistry. Facts and Relationships. Moscow. (In Russ.)
- Belykh, O. A. 2024. Preservation of biodiversity in the Pribaikalsky National Park during road construction. *XXI Century. Technosphere Safety*, 9(1(33)), pp. 8–18. DOI: <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2024-9-1-8-18>. EDN: IQOTJP. (In Russ.)
- Grebenshikhova, V. I., Lustenberg, E. E., Kitaev, N. A., Lomonosov, I. S. 2008. Geochemistry of Baikal environment. Baikal geocological poligon. Novosibirsk. (In Russ.)
- Phase diagrams of refractory oxide systems: Handbook. 1985. In 6 issues. Issue 5. Binary systems. Ed. F. Ya. Galakhov. Leningrad. (In Russ.)
- Dudarev, V. I., Minaeva, L. A. 2024. Application of carbon sorbents for extraction of manganese from solutions. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*, 14(1(48)), pp. 35–40. DOI: <https://doi.org/10.21285/achb.897>. EDN: NNHBMP. (In Russ.)
- Zvereva, N. A., Belozertseva, I. A. 2023. Recreational transformation of soils of the Eastern Olkhon region. *Regional Geosystems*, 47(2), pp. 175–191. DOI: <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-2-175-191>. EDN: GFUTKD. (In Russ.)
- Zvereva, N. A., Lopatina, D. N., Belozerceva, I. A. 2019. Ecological state of soils of Priolkhonye in the recreational zone. Proceedings of the XIV All-Russian scientific-practical conf. with international participation *Ecology of the native land: Problems and ways of their solution*, Kirov, April 16–18, 2019. Kirov, pp. 169–172. EDN: XTHAPK. (In Russ.)
- Maksimovich, N. G., Khajrulina, E. A. 2011. Geochemical barriers and environment protection. Perm. (In Russ.)
- Musikhin, M. A. 2014. The problem of rational use of natural resources of territories (on the example of Lake Baikal). *Monitoring. Science & Technologies*, 4(21), pp. 41–50. EDN: TDXDAL. (In Russ.)
- Myazin, V. A., Shushkov, D. A., Fokina, N. V., Chaporgina, A. A. et al. 2024. Evaluation of the effectiveness of biogeosorbents based on mineral carriers for cleaning oil-contaminated soil. *Vestnik of MSTU*, 27(1), pp. 91–102. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-1-91-102>. EDN: DDKRVR. (In Russ.)
- Nesterova, L. A., Polyakova, S. D. 2017. Soil pollution with heavy metals as an indicator of the state of the natural environment of the Tazheran steppe. *Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*, 2, pp. 68–73. EDN: ZAEQQN. (In Russ.)
- Nikashina, V. A. 2019. Permeable geochemical barriers as a way to protect the environment from pollution. Natural sorbents for solving environmental problems. Mathematical modeling and calculation of processes. Review. *Sorption and Chromatography Processes*, 19(3), pp. 289–304. DOI: <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2019.19/746> EDN: OXEVRP. (In Russ.)
- Pankeeva, N. S. 2014. Impact of tourism on the natural complex of the Pribaikalsky National Park. Proceedings of the 2nd Intern. Student scientific-practical conf. *Communication technologies: Socio-economic and information aspects*, Irkutsk, April 15, 2014. Irkutsk, pp. 133–137. EDN: SYVZIN. (In Russ.)
- Roldugin, V. I. 2011. Surface Physicochemistry. Dolgoprudnyy. (In Russ.)
- Salanginas, L. A. 2003. Changes in soil properties under the influence of oil pollution and development of a system of measures for their rehabilitation. Ph.D. Thesis. Yekaterinburg. (In Russ.)
- Sergacheva, E. A., Igumenshcheva, V. V. 2020. Research of the tourist and recreational zone of the Pribaikalsky National Park. *Scientific Papers Collection of the Angarsk State Technical University*, 1(17), pp. 243–250. DOI: <https://doi.org/10.36629/2686-7788-2020-1-243-250>. EDN: HNHGFQ. (In Russ.)
- Slepneva, E. V., Dulya, K. V. 2019. Prospects for the creation of a tourism and recreation cluster "Tourism without borders" in the Pribaikalsky National Park. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series: Earth Sciences*, 28, pp. 89–107. DOI: <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.28.89>. EDN: CACRVA. (In Russ.)
- Filippov, A. 1989. Cave geology of Baikal Lake shore. Proceedings of the 10th International Congress of Speleology, Budapest, 1989. Vol. 2, pp. 583–585. (In Russ.)
- Environmental Chemistry. 1982. Ed. Bokris Dzh. O. M. Moscow. (In Russ.)

- Khramova, A. I., Markov, I. S. 2021. Analysis of the recreational zone of the Baikal protected area for organizing tourism activities. Proceedings of All-Russian Conf. with international participation, dedicated to the 100th anniversary of training specialists in the field of Earth sciences at Tomsk State University *Dynamics and interaction of the Earth's geospheres*, November 8–12, 2021, in 3 volumes. Tomsk. Vol. 3, pp. 194–198. EDN: GNMLCV. (In Russ.)
- Yurmazova, T. A., Shakhova, N. B., Xoang, Ch. T., Plankina, M. V. 2018. Adsorption of petroleum products and inorganic ions on a mineral sorbent. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 329(5), pp. 125–134. EDN: XVXWPI. (In Russ.)
- Yakovecz, N. A., Opanasenko, O. N., Krutko, N. P. 2013. Modification of petroleum resin-asphaltene dispersions with oxyethylated surfactants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 2, pp. 10–15. EDN: VKXRKX. (In Russ.)
- Yakovleva, A. A., Guseva, E. A., Do, Tuan Van. 2018. Absorption properties of sands of recreational zones of the southwestern coast of Lake Baikal in relation to some agents. Proceedings of V All-Russian scientific-practical conf. *Biotechnology in the interests of ecology and economy of Siberia and the Far East*, Ulan-Ude, June 25–27, 2018. Ulan-Ude, pp. 94–100. EDN: UZVDYQ. (In Russ.)
- Yakovleva, A. A., Nguen, Ch. T. 2021. Characteristics of sorption processes on the surface of river sands with the participation of iron (III) ions. *Zhurnal Fizicheskoi Khimii*, 95(6), pp. 933–938. DOI: <https://doi.org/10.31857/s0044453721060285>. EDN: OIAKMH. (In Russ.)
- Yakovleva, A. A., Nguen, Ch. T., Do, V. T. 2020. Some features of the barrier qualities of sands of the South-West Baikal region in relation to typical ecologically aggressive runoff. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*, 10(1), pp. 159–168. DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-159-168>. EDN: XGFCLF. (In Russ.)
- Gennadiev, A. N., Pikovskii, Yu. I. 2007. The maps of soil tolerance toward pollution with oil products and polycyclic aromatic hydrocarbons: Methodological aspects. *Eurasian Soil Science*, 40(1), pp. 70–81. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1064229307010115>.

Сведения об авторах

Яковлева Ариадна Алексеевна – ул. Лермонтова, 83, г. Иркутск, Россия, 664074;
Иркутский научно-исследовательский технический университет, д-р техн. наук, профессор;
e-mail: ayakovistu@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5747-2864>

Ariadna A. Yakovleva – 83 Lermontov Str., Irkutsk, Russia, 664074;
Irkutsk Scientific Research Technical University, Dr Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: ayakovistu@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5747-2864>

Силушкина Элла Алексеевна – ул. Лермонтова, 110, г. Иркутск, Россия, 664074;
Восточно-Сибирский институт МВД России, ст. преподаватель;
e-mail: esilushkina@mail.ru, SPIN – код 2856-9710

Ella A. Silushkina – 110 Lermontov Str., Irkutsk, Russia, 664074;
East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Senior Lecturer;
e-mail: esilushkina@mail.ru, SPIN – code 2856-9710