



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2022. Т. 22, вып. 2. С. 161–169
Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology, 2022, vol. 22, iss. 2, pp. 161–169
<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2022-22-2-161-169>

Научная статья
УДК 544.7



Оценка сорбционных качеств прибрежных песков по отношению к эмульгированным нефтепродуктам

А. А. Яковлева , Ч. Т. Нгуен

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83

Яковлева Ариадна Алексеевна, доктор технических наук, профессор кафедры химии и пищевой технологии им. проф. В. В. Тузуриной, ayakovistu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5747-2864>

Нгуен Чунг Тхуй, аспирант кафедры химии и пищевой технологии им. проф. В. В. Тузуриной, nguyentrungthuy_irk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5876-9256>

Аннотация. Рассмотрены сорбционные свойства некоторых песков, отобранных в прибрежных зонах экономически важных, но в то же время экологически угнетенных территорий Вьетнама. Цель исследований – оценка поглотительной способности песков по отношению к эмульгированным нефтепродуктам, выявление их экологической роли в типичных ситуациях разлива небольших количеств токсичных веществ. Показано, что сорбционные качества песков зависят от местонахождения песков, их геохимической и гранулометрической неоднородности. Оказалось, что по содержанию α -кварца используемые пески можно разделить на два типа с четко выраженной корреляционной связью сорбционных качеств с содержанием минерала. Кварцевые пески, представленные мелкозернистыми окатышами, обладают высокой способностью удерживать нефтяные пленки. Пески с содержанием 10–11% (мас.) корунда представлены более крупными и острогранными частицами с меньшей насыпной плотностью и пониженными поглотительными способностями. Для каждого песка, максимально насыщенного бензиновыми компонентами, исследована реакция на «дождливую» или «солнечную» погоду. Для первого случая проведена десорбция с многократным промыванием водой, во втором – высушивание с нагреванием и последующим однократным пропуском воды через слой песка. Показано, что пленки бензина прочно удерживаются на частицах песка при промывании, но легко удаляются при нагревании. При многократном промывании нижележащих слоев достигает около четверти от исходного содержания бензина в эмульсии, которая фильтруется через песок. При высушивании с нагреванием из песков рассеивается до четверти легколетучих углеводородов, в фильтрах же оказывается незначительное количество органики.

Ключевые слова: песок, сорбция, фильтрование, удерживание, поглотительная способность, эмульгированные нефтепродукты, экологический барьер

Для цитирования: Яковлева А. А., Нгуен Ч. Т. Оценка сорбционных качеств прибрежных песков по отношению к эмульгированным нефтепродуктам // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2022. Т. 22, вып. 2. С. 161–169. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2022-22-2-161-169>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Evaluation of the sorption properties of coastal sands in relation to emulsified petroleum products

А. А. Yakovleva , Tr. T. Nguye

Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Ariadna A. Yakovleva, ayakovistu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5747-2864>

Thuy Tr. Nguyen, nguyentrungthuy_irk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5876-9256>

Abstract. The sorption properties of some sands selected in the coastal zones of economically important, but at the same time ecologically oppressed territories of Vietnam are considered. The purpose of the research is to assess the absorption capacity of sands in relation to emulsified petroleum products, to identify their ecological role in typical situations of spillage of small amounts of toxic substances. It is shown that the sorption qualities of the sands depend on the location of the sands, their geochemical and granulometric heterogeneity. It turned out that according to the content of α -quartz, the sands used can be divided into two types with a clearly expressed correlation of sorption qualities with the mineral content. Quartz sands, represented by fine-grained pellets, have a high ability to retain oil films. Sands with a content of 10–11% (wt.) corundum are represented by larger and sharper-edged particles with lower bulk density and reduced absorption capacity. For each sand maximally saturated with gasoline components, the reaction to “rainy” or “sunny” weather has been investigated. For the first case, desorption with repeated washing with water has been carried out, in the second case, drying with heating and subsequent single passing of water through a layer of sand. It is shown that gasoline films are firmly held on sand particles during washing, but are easily removed when heated. With repeated washing of the underlying layers, it reaches about a quarter of the initial gasoline content in the emulsion, which is filtered through sand. When drying with heating,



up to a quarter of volatile hydrocarbons are dispersed from the sands, while an insignificant amount of organic matter is found in the filtrates.
Keywords: sand, sorption, filtering, absorption ability, holding, emulsified petroleum products, sand filter, ecological barrier

For citation: Yakovleva A. A., Nguye Tr. T. Evaluation of the sorption properties of coastal sands in relation to emulsified petroleum products. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2022, vol. 22, iss. 2, pp. 161–169 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2022-22-2-161-169>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Нефть и получаемые из нее нефтепродукты широко используются практически во всех отраслях народного хозяйства. При добыче, хранении, транспортировке и переработке нефтепродукты в значительных количествах попадают и загрязняют окружающую среду, нарушая ход естественных биохимических процессов. Загрязнения нефтью и нефтепродуктами чрезвычайно опасны, они создают значительную токсичную нагрузку на воду, почву, воздух, биологические объекты [1–5]. Особая ситуация связана с загрязнением прибрежных грунтов открытых бассейнов (рек, озер, морей) и близко лежащих подземных вод. Загрязнение прибрежных грунтов может происходить неконтролируемыми стоками предприятий, а также ежедневным вмешательством человека (лужицы топлива под автомобилем, механическое перемешивание песка под колесами и т. п.). Нефтяные эмульсии оказывают негативное воздействие на биоту прибрежных областей и водных бассейнов и могут стать причиной опасных ситуаций. Поэтому важно оценить способность прибрежных грунтов принимать на себя роль экологических барьеров, защищать глубинные слои почв от проникновения нефтепродуктов и участвовать в процессах установления экологического равновесия [6, 7]. От природной способности песков к накоплению поллютантов зависит, насколько опасным является загрязнение окружающей среды.

Принятие новых, более строгих норм по защите природы требует обоснования и всесторон-

него изучения экологических проблем, связанных, в частности, с ситуациями разлива нефтепродуктов на почвы [8–17]. Авторами работы проведено моделирование ситуации разлива нефтепродуктов на песчаные почвы. При проведении экспериментов использованы 4 образца прибрежных песков и водные эмульсии, которые имитируют бензинсодержащие стоки. Целью работы является оценка способности песков к удерживанию бензиновых фракций и выполнению роли регулятора экологического равновесия. Для достижения цели проведены опыты, в которых эмульсии бензина пропускали через фильтрующий слой песка заданной массы (высоты) и определяли содержание бензина в фильтрате.

Материалы и методы

В работе рассмотрены пески, отобранные на берегах вьетнамских рек Хонгха (А), Тхубон (Б), Тхачхан (К) и залива Бакбо (Г). Для того чтобы оценить природную фильтрационную способность песков, специальной обработки образцов перед исследованиями не проводили. Минералогическая плотность, объемная масса при рыхлом и плотном сложении, гранулометрический состав изучены ранее [18]. Адсорбционные исследования проведены с фракциями, соответствующими максимумам на кривых распределения. Характеристика минеральной структуры образцов песка получена на рентгеновском дифрактометре XRD-7000 X-ray Shimadzu (Япония). Для примера на рис. 1 представлена дифрактограмма песка К с расшифровкой (matched phases) в табл. 1.

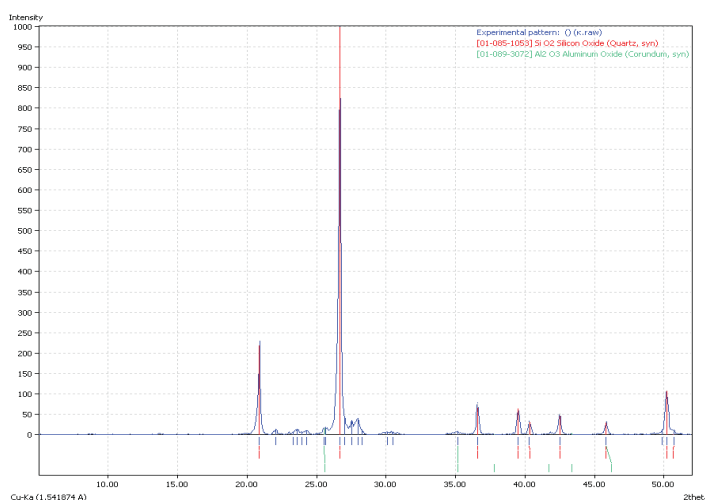


Рис. 1. Дифрактограмма песка К
Fig. 1. Diffractogram of sand K



Таблица 1 / Table 1

**Минералогический состав песка К (Matched Phases)
Mineralogical composition of K sand (Matched Phases)**

A: Silicon Oxide (Quartz, syn)		B: Aluminum Oxide (Corundum, syn)	
Formula	SiO ₂	Formula	Al ₂ O ₃
Entry number	01-085-1053	Entry number	01-089-3072
Figure-of-Merit (FoM)	0.940705	Figure-of-Merit (FoM)	0.548071
Total number of peaks	29	Total number of peaks	25
Peaks in range	8	Peaks in range	6
Peaks matched	9	Peaks matched	3
Intensity scale factor	1.00	Intensity scale factor	0.02
Quant. (weight %)	89.11	Quant. (weight %)	10.89

В работе использовали бензин АИ-92 по ГОСТ 32513-2013 от ООО «СибирьЭнергоКомплект» и гексан по ТУ 2631-001-54260861-2013 фирмы Криохром.

Эмульсии бензина АИ-92 готовили растворением 1 мл бензина в 0.5 дм³ дистиллированной воды в делительной воронке при сильном и длительном встряхивании. Через 10–15 мин проводили экстракцию и для опытов использовали нижнюю часть.

Концентрацию эмульсии бензина АИ-92 определяли флуориметрическим методом по методике ПНД Ф 14.1:2:4.128-98 (Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов ...) с помощью прибора «Флюорат 02-5М» фирмы ЛЮМЕКС (Россия).

Для градуировки шкалы анализатора использовали стандартный и градуировочные растворы бензина АИ-92 в гексане. Из стандартного с концентрацией 100 мг/дм³ были приготовлены градуировочные растворы с концентрациями от 5 до 40 мг/ дм³.

Сорбцию проводили в колонке диаметром 0.01 м, куда засыпали некоторое количество песка известной массы, уплотняли аккуратным постукиванием и измеряли высоту слоя сорбента. При рыхлом заполнении рабочего пространства высота слоя песка соответствовала массе навески с учетом дисперсности (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Высота слоя для разных навесок песка, м
The height of sand layers, m**

Масса навески, г / The mass of sand samples, g	Тип песка / The type of sand			
	А	Б	Г	К
3	0.0265	0.0270	0.0260	0.0275
5	0.0445	0.0450	0.0440	0.0465
8	0.0745	0.0750	0.0740	0.0755

Через слой песка пропускали 0.025 дм³ бензиновой эмульсии с одинаковой скоростью, которую контролировали с помощью специального зажима.

Для определения удерживаемости бензиновых фракций песками измеряли концентрацию бензина в фильтратах после пропускания эмульсии через слой песка. Степень удерживания песком бензина из водного раствора *R* рассчитывали по относительной разности начальной *C*₀ и конечной *C*_к концентраций бензина:

$$R = \frac{C_0 - C_k}{C_0} \cdot 100\%.$$

Для оценки прочности сцепления пленок бензина песчаным слоем проводили десорбцию и промывание песка водой, всякий раз используя 0.025 дм³ дистиллированной воды и контролируя состав фильтрата. Промывание вели при активном встряхивании до некоторой минимальной концентрации бензина в стоке. Эксперименты с многократным промыванием имитировали условия дождей в природе. Полного очищения песка от бензиновых пленок в таких экспериментах получить не удалось даже 6–7–8-кратным промыванием. Для воспроизведения ситуации солнечного дня навески песка, насыщенные углеводородами из эмульсий, высушивали без перемешивания до воздушно-сухого состояния и загружали обратно в колонки. Опыты проводили при комнатной температуре (23 ± 2 °С), высушивание навесок в течение 15 мин – в сухом колоне термостата UTU-4 при температуре 35 ± 2 °С.

Различный дисперсный состав песков и их насыпная плотность допускали маневрирование условиями опытов при оценке значимости физических условий сорбции. Предел относительной погрешности проведенных экспериментов с доверительным интервалом 0.95 не превышал 5%. Для графической интерпретации использовали



программу Microsoft Excel. Экспериментальные точки на графиках представляют среднее значение двух-трех независимых опытов.

Результаты и их обсуждение

Степень удерживания бензиновых фракций из эмульсий исследуемыми песками при разных навесках сорбента представлена на рис. 2.

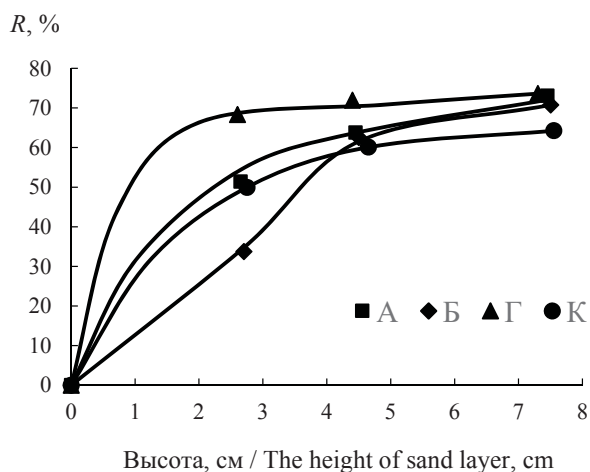


Рис. 2. Удерживание бензина при однократном насыщении песка

Fig. 2. Retention of gasoline with a single saturation of sand

Для всех песков эффективность удерживания бензина закономерно увеличивается с повышением массы навесок (с высотой слоя песка). На начальных участках изотерм речные пески А, Б и К имеют меньшие значения величины R по сравнению с морским песком, но затем показатели песков А и Б выходят на сопоставимые с песком Г значения.

При сравнении полученных результатов обнаружилось, что методически близкими оказываются те публикации, в которых песок рассматривается как фильтровальный материал в процессах очистки воды от нефтяных загрязнений [19–21]. В работе [19] авторами показано, что при высоте песчаного слоя в 0.03 м эффективность нефтеудаления достигает 90%, в работах [20, 21] авторы добиваются еще более высоких показателей очистки, используя при сопоставимой толщине фильтрационного слоя (0.086 м) трехуровневую структуру. В нашем случае таких показателей достичь не удастся, предельные значения R едва приближаются к 75% и в этом отражается, очевидно, не только особенность исследуемых песков, но и цель исследования. В цитируемых работах рассматриваются проблемы фильтрации с точки зрения очистки воды, авторы прилагают усилия для повышения показателей нефтеудерживания. Нами способность песков

удерживать нефтепродукты рассматривается как их природное свойство, однако цитируемые источники подтверждают обнаруживаемые нами закономерности.

Присутствие следов бензина в фильтрате свидетельствует о непрочном сцеплении пленок углеводородов с поверхностью песчаных частиц, несмотря на то, что, казалось бы, предрасположенность такого взаимодействия высока.

При небольшом слое сорбента низкие значения степени удерживания у песка Б, на наш взгляд, связаны с тем, что почти три четверти массы этого песка составляют частицы размером 0.42 ± 0.02 мм. Высокая однородность и равномерная зернистость данного песка способствуют формированию такого межпористого пространства, когда углеводородные составляющие свободно и быстро перемещаются с объемом эмульсии через сравнительно небольшой слой, лишь незначительно задерживаясь на поверхности. У песков А и К для такой же толщины слоя показания R одинаковы при схожих значениях степени однородности, гораздо меньших, чем у песка Б.

Изотерма для песка Г (см. рис. 2) свидетельствует, что углеводородные пленки из обводненной смеси нефтепродуктов прочнее всего адсорбируются и не вымываются водой с чистого кварцевого песка. Повышение фильтрационного слоя сорбента приводит к частичной утрате доминирования геометрических параметров и дисперсности. Не менее важными при этом становятся нативные свойства поверхности, связанные с содержанием кварца в песке.

Видно, что пески А, Б и Г обладают в целом неплохой способностью к удерживанию бензина, в слое песка до 8 см удерживается более 70% легких углеводородов. Очевидно, верхние слои прибрежных песков этих типов, выполняя функцию экомарьеров, способны защищать нижележащие слои от загрязнений, в них поступает не более 30% пролитого бензина.

Результаты десорбции в сериях опытов с воспроизведением природных явлений (дождь или испарение с поверхности в солнечный день) представлены на рис. 3.

Неоднократное промывание песка, насыщенного бензиновыми составляющими, не приводит к восстановлению свойств частиц, пленки нефтепродуктов остаются на поверхности. На рис. 3 в столбцах со штриховкой «1» (тупой угол к продолжению оси абсцисс) представлены значения степени удерживания бензина 8-сантиметровым слоем для всех песков. Такая же, достаточно типичная, ситуация характерна

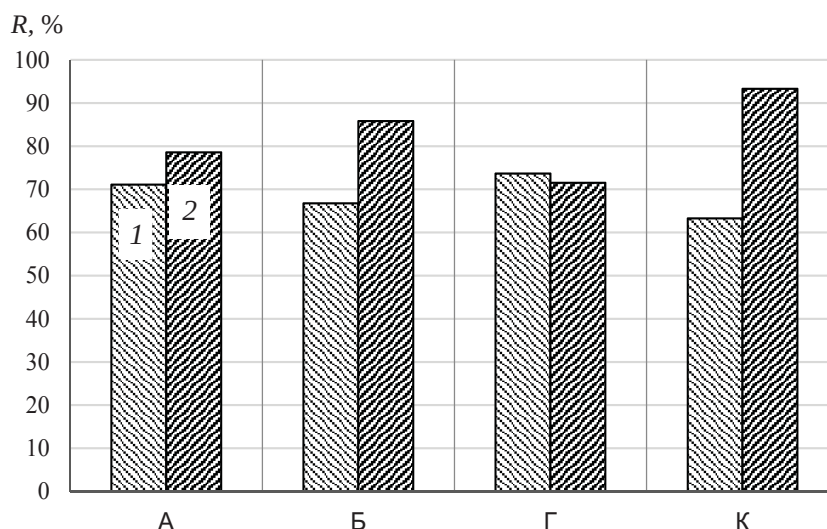


Рис. 3. Степень удерживания песками бензина при многократном промывании (1) и высушивании с нагревом (2). Высота фильтрующего слоя 0,08 м
 Fig. 3. The degree of retention of gasoline by sands during repeated washing (1) and drying with heating (2). The height of the filter layer is 0.08 m

для всех песков и при высоте слоя в 3 и 5 см. Столбцы со штриховкой «2» (острый угол к продолжению оси абсцисс) показывают увеличение степени удерживания песками, которые после насыщения их бензиновыми составляющими были просушены с подогревом. Увеличение R в этом случае достигается за счет того, что легкие компоненты бензиновых фракций при высушивании частично улетучились с поверхности. Промывание таких песков показывает, что барьерные качества улучшаются во всех случаях,

но и в этих результатах проявляется влияние свойств фильтрующего материала, связанных с исходным геолого-географическим характером.

Для коллоидно-химического объяснения полученных результатов в различии свойств песков по отношению к бензину необходимо рассмотрение совокупности всех факторов, которые влияют на ситуацию. Кроме насыпной плотности и размеров зерен песка, к ним относятся гранулометрия и химический состав, определяющие адгезионные свойства поверхности (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

Некоторые свойства песков
Some properties of sands

Свойства / Properties	Тип песка / The type of sand			
	А	Б	Г	К
SiO ₂ , % (мас.) / SiO ₂ , (% by mass)	98.38	89.93	98.99	89.11
Al ₂ O ₃ , % (мас.) / Al ₂ O ₃ , (% by mass)	1.62	10.07	1.01	10.89
Средний размер частиц, мм / Average particle size, mm	0.294	0.429	0.241	0.849
Коэффициент однородности, % / Coefficient of uniformity, %	53.125	72.240	66.919	61.367
Плотность, кг/м ³ / Density, kg/m ³	1414	1397	1432	1370

Содержание кварца в песке оказывается важным при рассмотрении механизма сорбции. Из табл. 3 следует, что содержание кварца в песках изменяется в порядке К < Б < А < Г. Изменение максимальной удерживаемости песков по отношению к бензиновым компонентам симбатно этой тенденции (рис. 4).

Более того, положение точек на графике позволяет разделить изучаемые пески на два типа, которые имеют свои особенности по отношению сорбции нефтесодержащих эмульсий. Усложнение химического состава минерального сорбента всегда влияет на механизм сорбции. Появление в кристаллической решетке песчаных частиц

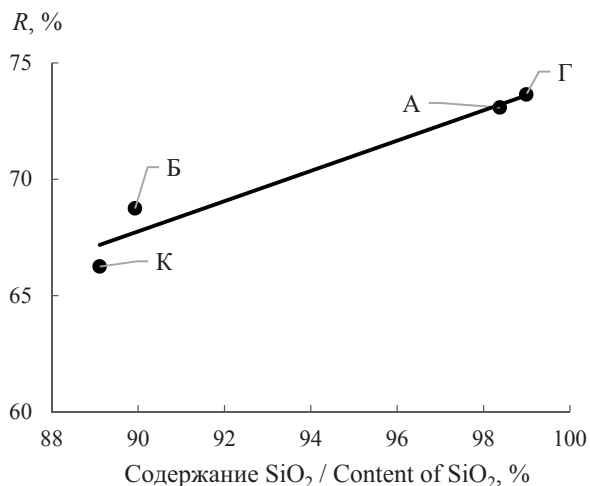


Рис. 4. Эффективность удаления бензина песками
Fig. 4. Efficiency of gasoline removal by sands

корунда влияет на прилипание бензиновых пленок к поверхности и на изменение свойств контактных площадок, поскольку этот минерал

обладает иными свойствами. Например, неодинаково отношение радиусов катионов алюминия и кремния и аниона кислорода, составляющее 0.415 и 0.387 соответственно, существенно различаются константы Гамакера оксидов по отношению к воде и другие свойства [22, 23]. Это влечет различие в энергиях адгезионного взаимодействия и, как следствие, в изменениях удерживающей способности песка, которые связаны с поверхностным структурированием [24, 25]. Вместе с тем, изменение количества корунда в пределах 1–1.5% в песках А и Г приводит к небольшим изменениям показателя R, в то время как присутствие 10–11% корунда в песках Б и К проявляется очень резкими отклонениями. На наш взгляд, это связано с тем, что кроме различий кристаллических решеток значимыми оказываются площади контакта. С повышением размеров частиц (а наиболее это проявляется у песка К) удерживающая способность снижается весьма существенно (рис. 5).

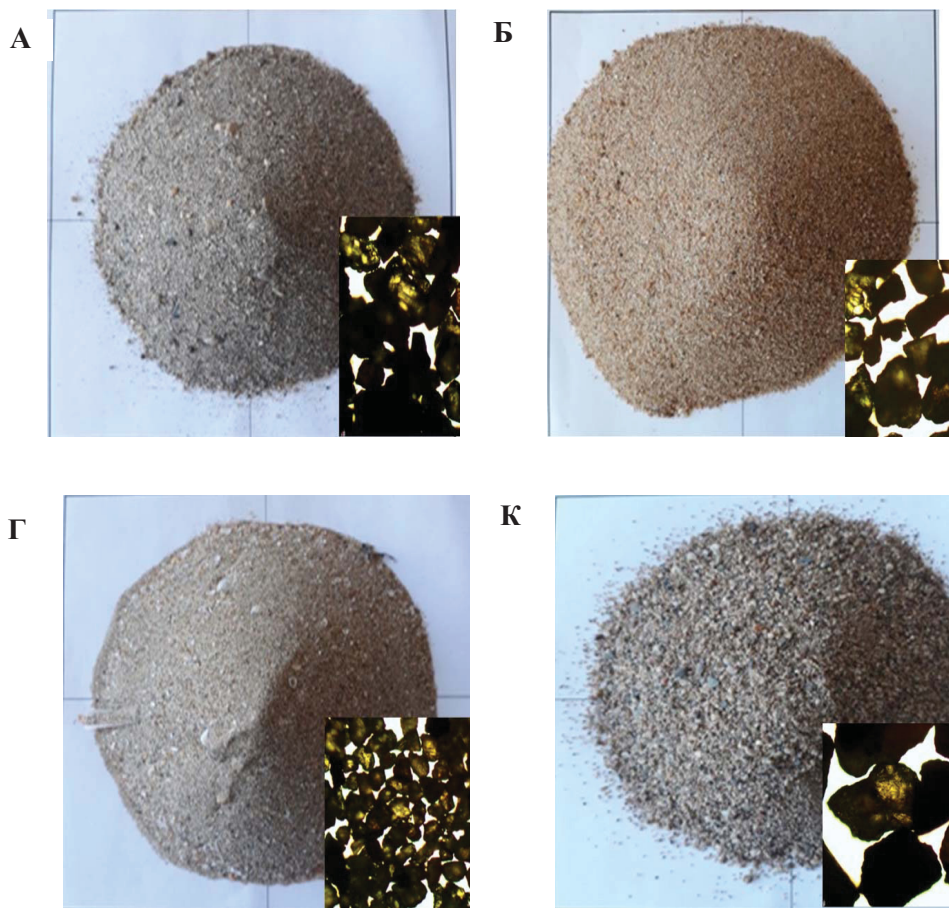


Рис. 5. Фотографии песков в исходном виде (при квартовании) и при 50-кратном увеличении исследуемой фракции

Fig. 5. Photos of the sands in their original form (with quartering) and with a 50-fold increase in the studied fraction



У песков Б и К, судя по микрофотографиям, различия обнаруживаются не только в размерах частиц, но и в их форме, рельефе поверхности, присутствии острых углов и резких граней, выступов и впадин на микроуровне.

Совокупность факторов, определяющих специфику фазовых контактов (крупнозернистость, гранулометрическая и химическая неоднородность) свидетельствует, что песок К по своей способности предохранять нижележащие слои от негативных воздействий уступает остальным пескам.

Заключение

Исследована сорбционная способность к удерживанию бензиновых фракций в ситуации разлива нефтепродуктов на песках, отобранных на берегах рек и морского залива во Вьетнаме. Результаты свидетельствуют, что роль экологических барьеров, изначально заложенная в природе песка, связана с геолого-географической характеристикой образцов. Практически все пески при ~ 0,08-метровом слое удерживают от 60 до 70 и более % (мас.) бензиновых фракций из водных эмульсий. Однако у разных песков способность удерживать нефтепродукты различна и зависит от степени дисперсности, однородности, особенностей рельефа частиц и их минерального состава.

В реальных условиях прибрежные пески находятся в подвижном состоянии из-за различных природных явлений (приливы-отливы, сезонные изменения в виде таяния снега и льда и т. п.), а также деятельности человека. Многократное десорбирование, равноценное просачиванию дождевой воды через верхние рыхлые слои песков, приводит к небольшому понижению (до 10–12%) степени удерживания нефтепродуктов за счет вымывания маслянистых пленок с поверхности и увеличения концентрации нефтепродукта в фильтрате.

Однократная десорбция на образцах, которые были изначально насыщены бензиновыми эмульсиями, а затем просушены при температуре 35 ± 2 °С, показала повышение степени удерживания нефтепродуктов за счет улетучивания легких фракций бензина. Высушивание загрязненных образцов, по сути, имитирует испарения с поверхности, в природе достаточно активные.

Определено, что морской песок, представленный окатышами, мелкодисперсными и достаточно однородными по размерам и составу (99% SiO₂), обладает самой высокой сорбционной способностью, однако речной песок с близким содержанием кварца обладает схожей сорбцион-

ной способностью и это позволяет выделить их в отдельный тип природных смесей. К другому типу могут быть отнесены пески, в состав которых входит до 10–11% (мас.) корунда. В силу своей крупнозернистости и сложной формы (острые углы между гранями) этот тип песков имеет особенности механизма заполнения зазоров при фильтрации, что является причиной пониженной поглотительной способности.

Список литературы

1. Филатов Д. А., Овсянникова В. С. Загрязнения окружающей среды нефтяными углеводородами : проблемы и решения // Экологический вестник России. 2017. № 6. С. 8–12.
2. Филатов Д. А., Овсянникова В. С. Природные процессы самовосстановления нефтезагрязненных биоценозов // Экологический вестник России. 2017. № 10. С. 17–20.
3. Гамм Т. А., Смирнова Н. В. Влияние тяжелых нефтепродуктов на экологическое состояние почв и грунтовых вод // Экология и промышленность России. 2016. Т. 20, № 10. С. 46–49. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-10-46-49>
4. Оборин А. А., Хмурчик В. Т., Иларионов С. А., Маркарова М. Ю., Назаров А. В. Нефтезагрязненные биоценозы: Процессы образования, научные основы восстановления, медико-экологические проблемы. Пермь : УрО РАН, 2008. 511 с.
5. Харченко С. Г., Дорохина Е. Ю. Экологическая безопасность: кризис продолжается // Экология и промышленность России. 2016. Т. 20, № 3. С. 52–57. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-3-52-57>
6. Яковлева А. А., Нгуен Ч. Т., До В. Т. Некоторые особенности барьерных качеств песков юго-западного Прибайкалья по отношению к типичным экологически агрессивным стокам // Изв. вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2020. Т. 10, № 1 (32). С. 159–168. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-159-168>
7. Яковлева А. А., Нгуен Ч. Т. Характеристика сорбционных процессов на поверхности речных песков с участием ионов железа (III) // ЖФХ. 2021. Т. 95, № 6. С. 933–938. <https://doi.org/10.31857/S0044453721060285>
8. Горбунова Н. С., Громовик А. И., Черепухина И. В., Терентьева Ю. Ю. Сорбционные процессы в почвах. Вопросы изучения и современное состояние проблемы // Сорбционные и хроматографические процессы. 2021. Т. 21, № 2. С. 265–275. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2021.21/3360>
9. Елисеева Д. В. Охрана окружающей среды от негативного воздействия хозяйственной деятельности. Новосибирск : СибАК, 2015. 260 с.
10. Филиппова Е. В. Разработка и апробация новой экологозащитной геотехнологии на золоторудном предприятии Забайкальского края // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 7. С. 172–182. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-7-172-182>



11. Баннова Е. А., Залозная Е. П., Китаева Н. К., Мерков С. М., Мучкина М. В. Очистка сточных вод от нефтепродуктов с помощью природных сорбентов // *Вода : химия и экология*. 2012. № 11. С. 73–78.
12. Мерзлякова А. С., Околелова А. А., Заикина В. Н., Пасикова А. В. Изменение свойств нефтезагрязненных почв // *Изв. вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2017. Т. 7, № 2. С. 173–180. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2017-7-2-173-180>
13. Ковалева Е. И., Яковлев А. С. Научные подходы к нормированию загрязнения почв нефтепродуктами // *Экология и промышленность России*. 2016. Т. 20, № 10. С. 50–57. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-10-50-57>
14. 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.
15. Семенов И. Н., Королева Т. В. Мировой опыт нормирования содержания химических элементов в почве // *Экология и промышленность России*. 2019. Т. 23, № 2. С. 62–67. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-2-62-67>
16. Никитина Нат. В., Ламихова А. П., Никитина Над. В., Казаринов И. А. Адсорбция органических реагентов природным бентонитом, модифицированным полигидроксикомплексами алюминия и железа (III) // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология*. 2021. Т. 21, вып. 1. С. 23–30. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2021-21-1-23-30>
17. Махова Т. М., Доронин С. Ю. Глауконит как сорбент 4-нитрофенола // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология*. 2021. Т. 21, вып. 2. С. 152–158. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2021-21-2-152-158>
18. Яковлева А. А., Нгуен Ч. Т. К вопросу о барьерных качествах песков Северного и Центрального Вьетнама. Сорбция ионов железа (III) // *Российский химический журнал*. 2020. Т. 64, № 2. С. 80–84. <https://doi.org/10.6060/rcj.2020642.12>
19. Carvalho P.C.A.P., Foletto E. L., Barros Neto E. L., Chiavone-Filho O. Oil removal from oilfield produced water by sand filter // *Brazilian Journal of Petroleum and Gas*. 2016. Vol. 10, № 3. P. 161–170.
20. Almojjly A., Johnson D., Oatley-Radcliffe D. L., Hilal N. Removal of oil from oil-water emulsion by hybrid coagulation/sand filter as pre-treatment // *J. Water Process Eng.* 2018. Vol. 26. P. 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.09.004>
21. Almojjly A., Johnson D. J., Mandale S., Hilal N. Optimisation of the removal of oil in water emulsion by using ceramic microfiltration membrane and hybrid coagulation/sand filter-MF // *J. Water Process Eng.* 2019. Vol. 27. P. 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.11.007>
22. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М. : Альянс, 2008. 753 с.
23. Денисова Я. В., Сторожева М. Е. Химия в нефтегазовом деле. Коллоидная химия. Южно-Сахалинск : СахГУ, 2019. 68 с.
24. Русанов А. И. Сущность нового подхода к уравнению состояния монослоя // *Коллоидный журнал*. 2007. Т. 69, № 2. С. 149–161.
25. Товбин Ю. К. Расширение уравнения состояния для трехагрегатных систем на их границы // *Журнал физической химии*. 2022. Т. 94, № 11. С. 1740–1744. <https://doi.org/10.31857/S0044453720110291>

Reference

1. Filatov D. A., Ovsyannikova V. S. Environmental pollution by petroleum hydrocarbons: Problems and solutions. *Environmental Bulletin of Russia*, 2017, no. 6, pp. 8–12 (in Russian).
2. Filatov D. A., Ovsyannikova V. S. Natural processes of self-healing of oil-contaminated biocenoses. *Environmental Bulletin of Russia*, 2017, no. 10, pp. 17–20 (in Russian).
3. Gamm T. A., Smirnova N. V. Impact of heavy oil products on the ecological state of soils and groundwater. *Ecology and Industry of Russia*, 2016, vol. 20, no. 10, pp. 46–49 (in Russian). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-10-46-49>
4. Oborin A. A., Hmurchik V. T., Ilarionov S. A., Markarova M. Yu., Nazarov A. V. *Neftezagryaznennyye biogeocenozy: Processy obrazovaniya, nauchnye osnovy vosstanovleniya, mediko-ekologicheskie problem* [Oil-contaminated biogeocenoses: Formation processes, scientific foundations of restoration, medical and environmental problems]. Perm', UrO RAN Publ., 2008. 511 p. (in Russian)
5. Harchenko S. G., Dorohina E. Yu. Environmental safety: The crisis continues. *Ecology and Industry of Russia*, 2016, vol. 20, no. 3, pp. 52–57 (in Russian). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-3-52-57>
6. Yakovleva A. A., Nguyen T. T., Do T. V. Barrier property features of various sands of the South-Western Baikal region in relation to typical environmentally hazardous wastewater. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 159–168 (in Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-159-168>
7. Yakovleva A. A., Nguyen T. T. Characteristics of sorption on surfaces of river sands with the participation of iron(III) ions. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2021, vol. 95, no. 6, pp. 1216–1221 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S0036024421060285>
8. Gorbunova N. S., Gromovik A. I., Cherepuhina I. V., Terent'eva Yu. Yu. Sorption processes in soils. Study issues and the current state of the problem. *Sorption and Chromatography Processes*, 2021, Vol. 21, no. 2, pp. 265–275 (in Russian). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2021.21/3360>
9. Eliseeva D. V. *Ohrana okruzhayushchej sredy ot negativnogo vozdejstviya hozyajstvennoj deyatel'nosti* [Environmental protection from the negative impact of economic activity]. Novosibirsk, SibAK Publ., 2015. 260 p. (in Russian).



10. Filippova E. V. Development and testing of a new environmental protection geotechnology at the gold mining enterprise of the Trans-Baikal Territory. *Ipolytech Journal*, 2016, no. 7, pp. 172–182 (in Russian). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-7-172-182>
11. Bannova E. A., Zaloznaya E. P., Kitaeva N. K., Merkov S. M., Muchkina M. V. Purification of waste water from oil products using natural sorbents. *Voda: khimiya i ekologiya*, 2012, no. 11, pp. 73–78 (in Russian).
12. Merzlyakova A. S., Okolelova A. A., Zaikina V. N., Pasikova A. V. Changes in the properties of oil-contaminated soils. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 173–180 (in Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2017-7-2-173-180>
13. Kovaleva E. I., Yakovlev A. S. Scientific approaches to the regulation of soil pollution by oil products. *Ecology and Industry of Russia*, 2016, vol. 20, no. 10, pp. 50–57 (in Russian). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-10-50-57>
14. Yurmazova T. A., Shahova N. B., Hoang Ch. T., Plankina M. V. Adsorption of petroleum products and inorganic ions on mineral sorbent. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 5, pp. 125–134 (in Russian).
15. Semenov I. N., Koroleva T. V. World experience in standardizing the content of chemical elements in soil. *Ecology and Industry of Russia*, 2019, vol. 23, no. 2, pp. 62–67 (in Russian). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-2-62-67>
16. Nikitina Nat. V., Lamikhova E. P., Nikitina Nad. V., Kazarinov I. A. Adsorption of organic reagents by natural bentonites modified with aluminum and iron (III) polyhydroxocations. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2021, vol. 21, iss. 1, pp. 23–30 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2021-21-1-23-30>
17. Makhova T. M., Doronin S. Yu. Glauconite as a sorbent of 4-nitrophenol. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2021, vol. 21, iss. 2, pp. 152–158 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2021-21-2-152-158>
18. Yakovleva A. A., Nguen Ch. T. On the issue of the barrier qualities of the sands of North and Central Vietnam. Sorption of iron (III) ions. *Rossiyskiy Khimicheskij Zhurnal*, 2020, vol. 64, no. 2, pp. 80–84 (in Russian). <https://doi.org/10.6060/rcj.2020642.12>
19. Carvalho P. C. A. P., Foletto E. L., Barros Neto E. L., Chivavone-Filho O. Oil removal from oilfield produced water by sand filter. *Brazilian Journal of Petroleum and Gas*, 2016, vol. 10, no. 3, pp. 161–170.
20. Almojjly A., Johnson D., Oatley-Radcliffe D. L., Hilal N. Removal of oil from oil-water emulsion by hybrid coagulation /sand filter as pre-treatment. *J. Water Process Eng.*, 2018, vol. 26, pp. 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.09.004>
21. Almojjly A., Johnson D. J., Mandale S., Hilal N. Optimisation of the removal of oil in water emulsion by using ceramic microfiltration membrane and hybrid coagulation/sand filter-MF. *J. Water Process Eng.*, 2019, vol. 27, pp. 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.11.007>
22. Kasatkin A. G. *Osnovnye processy i apparaty himicheskoy tekhnologii* [Basic Processes and Equipment of Chemical Technology]. Moscow, Al'yans Publ., 2008. 753 p. (in Russian).
23. Denisova Ya. V., Storozheva M. E. *Himiya v neftegazovom dele. Kolloidnaya himiya* [Chemistry in The Oil and Gas Business. Colloid Chemistry]. Yuzhno-Sahalinsk, SahGU Publ., 2019. 68 p. (in Russian).
24. Rusanov A. I. The essence of the new approach to the equation of state of a monolayer. *Colloid Journal*, 2007, vol. 69, no. 2, pp. 149–161 (in Russian).
25. Tovbin Y. K. Extending the equation of state for three-aggregate systems to their interfaces. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2020, vol. 94, no. 11, pp. 2391–2395 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S0036024420110291>

Поступила в редакцию 04.02.22; одобрена после рецензирования 11.02.22; принята к публикации 14.02.22
 The article was submitted 04.02.22; approved after reviewing 11.02.22; accepted for publication 14.02.22