



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 56–65

Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 56–65

<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2025-25-1-56-65>, EDN: RLDBW

Научная статья

УДК 544.7

Повышение эффективности использования песков в качестве искусственных геохимических барьеров



А. А. Яковлева¹ ✉, В. И. Дударев¹, Т. Л. Х. Нгуен²

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83

²Нам Канто университет, Вьетнам, 94156, Кан Тхо провинция, Нинь Киеу район, ул. Нгуен Ван Ку, д. 168

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

Дударев Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры химии и биотехнологии им. В. В. Тутуриной, vdudarev@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-6477-4422>

Нгуен Тхи Ле Хуен, доктор органической химии, преподаватель кафедры физической химии, ntlhuyen@nctu.edu.vn

Аннотация. Исследовано взаимодействие песков как искусственных геохимических барьеров с растворами хлорида никеля, имитирующими технологические стоки. С помощью эксперимента рассмотрено влияние предварительной кислотной обработки песков на их способность к поглощению ионов никеля (II). В экспериментах исследованы пески с различным содержанием кварца, в которых единственным примесным элементом был оксид алюминия в количестве от 1 до 10% (мас.). Предварительную обработку песков 0,1 М раствором соляной кислоты проводили в течение 0,5 ч перемешиванием водно-песочной суспензии на магнитной мешалке. Использованы традиционные методы коллоидно-химических исследований. В статических условиях колбу с навеской песка (3 г) и раствором помещали в специальный встряхиватель, в динамических – через слой песка (3 г) в колонке пропускали раствор. Содержание никеля (II) в растворах определяли фотометрическим методом с диметилглиоксимом. По результатам адсорбционных исследований достигнуто увеличение предельной адсорбции от 15–20 до 50–56% в зависимости от типа песка и содержания в нем кварца. При фильтровании растворов через слой песка степень удерживания ионов никеля (II) на активированной поверхности зерен повышается. При скорости фильтрования 1×10^{-3} дм³/мин и одинаковой высоте засыпки ($2,7 \pm 0,1$ см) эффективность удаления ионов никеля из раствора возрастает. При этом повышение эффективности на 1–1,5% характерно для песков с высокими природными показателями в 95–98%. На песках, природная способность которых изначально не превышает 65–70%, рост эффективности более значителен и составляет до 5% и более. В целом повышение эффективности пропорционально содержанию кварца, т. е. обработка зерен песка соляной кислотой активирует преимущественно те участки поверхности, на которых локализуются связи кремния, т. е. силоксановые и силанольные группировки, которые выступают как центры адсорбции.

Ключевые слова: песок, сорбция, фильтрование, удерживание, поглотительная способность, ионы никеля, экологический барьер

Для цитирования: Яковлева А. А., Дударев В. И., Нгуен Т. Л. Х. Повышение эффективности использования песков в качестве искусственных геохимических барьеров // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2025. Т. 25, вып. 1. С. 56–65. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2025-25-1-56-65>, EDN: RLDBW

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

Article

Improving the efficiency of using sands as artificial geochemical barriers

A. A. Yakovleva¹ ✉, V. I. Dudarev¹, T. L. H. Nguyen²

¹ Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia

² Nam Can Tho University, 168 Nguyen Van Qu St., Ninh Kieu District, Can Tho Province 94156, Vietnam

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

Vladimir I. Dudarev, vdudarev@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-6477-4422>

Nguyen Thi Le Huen, ntlhuyen@nctu.edu.vn

Abstract. The interaction of sands as artificial geochemical barriers with nickel chloride solutions simulating technological effluents is investigated. The effect of pre-acid treatment of sands on their ability to absorb nickel (II) ions is considered experimentally. In experiments, sands with different quartz contents have been studied, in which the only impurity element was aluminum oxide in an amount from 1 to 10% (wt.). Pretreatment



of sands with 0.1 M hydrochloric acid solution has been carried out for 0.5 hours by stirring a water-sand suspension on a magnetic stirrer. Traditional methods of colloidal chemical research have been used. Under static conditions, a flask with a sand suspension (3 g) and a solution has been placed in a special shaker, under dynamic conditions, a solution has been passed through a layer of sand (3 g) in a column. The nickel (II) content in the solutions has been determined by photometric method with dimethylglyoxime. According to the results of adsorption studies, an increase in the maximum adsorption values from 15–20 to 50–56% has been achieved, depending on the type of sand and the quartz content in it. When filtering solutions through a layer of sand, the degree of retention of nickel (II) ions on the activated surface of the grains increases. At a filtration rate of $1 \times 10^{-3} \text{ dm}^3/\text{min}$ and the same filling height ($2.7 \pm 0.1 \text{ cm}$), the efficiency of removing nickel ions from the solution increases. At the same time, an increase in efficiency by 1–1.5% is typical for sands with high natural indicators of 95–98%. On sands, the natural capacity of which initially does not exceed 65–70%, the increase in efficiency is more significant and amounts to 5% or more. In general, the increase in efficiency is proportional to the quartz content, i.e., the treatment of sand grains with hydrochloric acid activates mainly those areas of the surface on which silicon bonds are localized, i.e. siloxane and silanol groupings, which act as adsorption centers.

Keywords: sand, sorption, filtration, retention, absorption capacity, nickel ions, environmental barrier

For citation: Yakovleva A. A., Dudarev V. I., Nguyen T. L. H. Improving the efficiency of using sands as artificial geochemical barriers. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2025, vol. 25, iss. 1, pp. 56–65 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2025-25-1-56-65>, EDN: RLDBW

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

Введение

Хозяйственная деятельность человека приводит к накоплению загрязняющих веществ в атмосфере, почвах и горных породах, подземных и поверхностных водах, живых организмах. Наряду с почвами и глиной, пески, благодаря активной поверхности своих частиц, являются естественными барьерами на пути миграции загрязнений в природных экосистемах. При изучении кинетики и термодинамики сорбции на песках как на фильтрующих минеральных материалах использовали пески, отобранные на берегах трёх крупных вьетнамских рек и на берегу Южно-Китайского моря [1]. Методика пробоотбора состояла в том, что в прибрежных зонах выбирали площадки с типичными признаками деятельности человека, например, песок ПЗ был отобран на берегу пляжа Хатинь, вблизи которого находится завод по производству стальной арматуры, стоки которого содержат тяжёлые металлы вышеразрешенных нормативов.

В задачи исследования входило установление роли песков в обеспечении способности экосистемы к самовосстановлению и сохранению своего стабильного состояния. Было установлено, что природные пески являются индикаторами состояния прибрежных зон и своеобразными геохимическими барьерами, определяя миграционные потоки большинства химических элементов.

Пески, обладающие определенными поглочительными свойствами, способны задерживать загрязнения, которые попадают в грунтовые и поверхностные воды, и тем самым вовлекаются в малый биологический и большой геологиче-

ский круговороты [2–8]. Вместе с тем пески широко используются в деятельности человека со схожими целями, играя роль искусственных геохимических барьеров, например, при фильтрации природных и сточных вод через барьер с осаждением загрязняющих веществ [9–11]. Песок может эффективно использоваться для адсорбции ионов многих тяжелых металлов. Никель относится к классу умеренно опасных веществ, поэтому неудивительно, что для удаления ионов Ni (II) из водных растворов метод адсорбции активно востребован [12–15]. Например, показано, что полнота адсорбции ионов никеля на речных песках из Индии (состав: 83,37% SiO₂, 1,454% Al₂O₃ и др.) может достигать 98,6–99,8% в зависимости от исходной концентрации раствора и дозировки адсорбента [16].

Изучение поглотительных свойств вьетнамских песков показало, что на песках остается значительное количество загрязняющих веществ. В динамических условиях эффективность удерживания ионов никеля (II) в слое песка высотой 3 см может достигать 98–99% [17, 18]. Однако с увеличением скорости потока изменяются гидродинамические условия и режим массообмена на поверхности зерен, что приводит к снижению эффективности извлечения. Активность сорбционного процесса в начальный период высока, но после насыщения поверхности способность к сорбции снижается. В темпах такого снижения обнаруживается активное влияние зернистости и однородности песка различного минерального состава.

Проведенные исследования доказывают потенциальную пригодность песков для использования их в качестве материала для очистки



загрязненных вод. Несмотря на недостатки – непостоянство кристаллохимического состава, сложный рельеф, дефекты структуры, меньшая по сравнению с искусственными сорбентами емкость и др. – применение таких материалов вследствие низкой стоимости часто экономически более целесообразно.

Полученные результаты значимы с теоретической точки зрения, поскольку показывают, что механизмы поверхностных явлений (адсорбция–десорбция–ионный обмен) подчиняются классическим представлениям с присущими частными особенностями. Однако они получены в модельных условиях, а для практического использования песков необходимо оценивать технологические возможности.

Цель исследования – оценить влияние химической активации на повышение поглотительной способности песков при использовании их в качестве искусственных геохимических барьеров.

Материалы и методы

В данных исследованиях использованы вьетнамские пески, которые по геохимическому составу можно рассматривать как кварцевые или кварцево-корундовые [1]. Морской песок (П1) содержит 98,99% (мас.) SiO_2 и к нему близок один из речных песков (П2), в котором содержание кварца составляет 98,38% (мас.). Вторая пара песков (П3 и П4), кроме кварца, содержит около 10–11% (мас.) Al_2O_3 .

При подготовке коллоидно-химических исследований проводили очистку зёрен песка от органических и других нетипичных включений, заметных невооруженным глазом. Чтобы оценить природную адсорбционную и фильтрационную способность, специальной обработки образцов перед исследованиями не проводили. После очистки проводили высушивание и квартование представительной пробы, а затем – ситовой анализ и исследование других свойств. Необходимые условия для анализа результатов адсорбционных исследований, а также сами адсорбционные исследования описаны ранее [17–19]. Мягкая кислотная активация нативных песков была проведена обработкой соляной кислотой, для этого к порции песка в химическом стакане добавляли некоторое количество 0,1 М HCl до соотношения Ж:Т = 10:1 и помещали на магнитную мешалку на полчаса. Скорость перемешивания составляла до 100 оборотов в минуту.

После этого твердую фазу отделяли, промывали, просушивали и использовали для отбора навесок в опытах по адсорбции. Проводили неоднократное промывание песка до приближения рН промывных вод к исходной величине (рН 5,9). Определение рН водных суспензий нативного и активированного песков после отфильтровывания проводили согласно ГОСТ 26423-85 потенциометрическим методом с помощью иономера лабораторного И-160МИ с датчиком температуры и ионоселективным электродом ЭСЛК-01.7.

При проведении адсорбционных исследований с активированным песком придерживались всех тех методов и методик, которые были использованы ранее [1, 17–19]. При исследовании адсорбционного процесса статическим методом колбы с суспензиями из навески песка после модифицирования массой 3,0 г в 25,0 см³ раствора помещали в специальный встряхиватель. Скорость перемешивания составляла 250 ± 50 об·мин⁻¹. При исследовании адсорбционного процесса динамическим методом навески песка массой 3,0 г помещали в колонки, в которых высота слоя песка составляла $2,7 \pm 0,1$ см (диаметр $1 \pm 0,1$ см) и пропускали 25,0 см³ исследуемого раствора. Скорость истечения контролировали зажимом со специально откалиброванным регулирующим устройством, представляющим элемент на основе медицинской инфузионной системы.

Адсорбционную емкость A (мг·г⁻¹) и эффективность удаления R (%) ионов вычисляли по формулам:

$$A = \frac{C_0 - C}{m} \cdot V \quad \text{и} \quad R = \frac{C_0 - C}{C_0} \cdot 100,$$

где C_0 и C – начальная и текущая (или конечная) концентрация ионов никеля (II) в растворе, мг·дм⁻³; V – объем рабочего раствора, дм³; m – масса адсорбента, г.

Температура опытов составляла $24,5 \pm 1$ °С.

Растворы, имитирующие никелевые загрязнения, готовили из навесок соли $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ марки ЧДА (ГОСТ 4038-79). Исходные растворы никеля (II) имели концентрацию 100,00 и 14,82 мг/дм³. Концентрацию ионов никеля (II) в растворе определяли спектрофотометрическим методом, согласно ПНД Ф 14.1.46-96.

Определение постоянных величин адсорбционного уравнения Ленгмюра

$$A = A_{\infty} \frac{K_L C}{1 + K_L C}$$

проводили по специально разработанной программе [20].



Результаты и их обсуждение

В табл. 1 приведены константы уравнения Ленгмюра, ранее найденные в исследованиях на нативных песках, и константы той же формы уравнения, полученные в опытах с модифицированными песками.

В отдельной графе показано относительное увеличение значения предельной адсорбции после обработки соляной кислотой ($A_{\infty, \text{кон}}$) по отношению к начальному значению ($A_{\infty, \text{исх}}$):

$$\varepsilon_1 = \frac{A_{\infty, \text{кон}} - A_{\infty, \text{исх}}}{A_{\infty, \text{исх}}} \cdot 100\%.$$

Полученные результаты свидетельствуют, что величина предельной адсорбции возрастает

от 15–20 до 50–56% в зависимости от типа песка, точнее, содержания в нем кварца. Степень удерживания ионов никеля (II) на поверхности песка зависит от кислотной обработки, в ходе которой изменяется характер поверхности, что согласуется с известными данными [21–23].

Обращают на себя внимание изменения значений коэффициента аппроксимации R^2 , характеризующего приближенность экспериментальной зависимости к идеальной форме математической модели. Для исходных песков R^2 -коэффициент практически равен единице. Отклонения для модифицированных песков, очевидно, связаны с тем, что кислотная обработка вносит некоторую разупорядоченность на поверхности песчинок, влияющую на результаты.

Таблица 1 / Table 1

Постоянные изотерм адсорбции ионов никеля (II) по модели Ленгмюра
Permanent adsorption isotherms of nickel (II) ions according to the Langmuir model

Пески / Sands	SiO ₂ , % (мас.) SiO ₂ , % (by mass)	Природные пески / Natural sands			Песок после обработки / Sand after processing			
		A_{∞} , мг/г A_{∞} , mg/g	K_L , дм ³ /мг K_L , dm ³ /mg	R^2	A_{∞} , мг/г A_{∞} , mg/g	K_L , дм ³ /мг K_L , dm ³ /mg	R^2	ε_1 , %
П1 S1	99	0,115	0,833	0,99	0,173	0,562	0,94	50,4
П2 S2	98	0,106	0,514	0,99	0,123	0,604	0,95	16,04
П3 S3	90	0,086	0,534	0,99	0,102	0,568	0,93	18,6
П4 S4	89	0,059	0,828	0,99	0,092	0,507	0,93	55,9

Примечание. Приведены содержания кварца, округленные до целых значений.

Note. The quartz content is given rounded to whole values.

В динамических условиях массообмена при пропускании раствора через слой песка получена зависимость адсорбции ионов никеля (II) (поглотительных качеств песка) от скорости фильтрации. Качественный анализ эффективности очистки и в этом случае удобно вести сравнением показателей свойств нативного песка и песка после обработки соляной кислотой. В табл. 2 представлены значения эффективности удаления ионов никеля (II) из раствора исходными песками R_1 и песками после обработки соляной кислотой R_2 и их сравнение, выраженное показателем:

$$\varepsilon_1 = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \cdot 100, \%$$

В исследованиях с природными песками показано, что максимальная эффективность

извлечения ионов никеля (II) из раствора может достигать 99% и выше при небольших скоростях истечения раствора, но с увеличением скорости потока эффективность снижается [17, 18]. Вымыванию ионов металла способствуют изменяющиеся гидродинамические условия на поверхности зёрен. Подобная аналогия проявляется в сериях опытов с активированными песками, но в количественных соотношениях это вымывание менее активно, сорбированные ионы металла прочнее удерживаются на поверхности. На первый взгляд, влияние содержания кварца в песке не столь очевидно, поэтому приведены дополнительные характеристики песков, а также в последней строке показано возрастание величины R по отношению к исходному. Сравнение приведено для опытов при небольших скоростях ($1 \cdot 10^{-3}$ дм³/мин) потока.



Таблица 2 / Table 2

Влияние свойств песка на эффективность процесса активации поверхности
Effect of sand properties on the effectiveness of the surface activation process

Свойства / Property	Тип песка / The type of sand			
	П1 S1	П2 S2	П3 S3	П4 S4
SiO ₂ , мас. % / SiO ₂ , % by mas	98,99	98,38	89,93	89,11
Пористость, % / Spongy, %	50,474	50,192	50,140	50,077
Средний размер частиц, мм / Average particle size, mm	0,241	0,294	0,429	0,849
Коэффициент однородности, % / Coefficient of uniformity, %	63,92	53,12	72,24	62,37
R ₁ , %	72,13	98,03	94,2	64,15
R ₂ , %	94,32	99,3	95,5	67,49
ε ₂ , %	31,76	1,30	1,38	5,42

Примечание. Удельная площадь поверхности песков определена методом адсорбции метиленового голубого [19].

Note. The specific surface area of the sand was determined by the methylene blue absorption method [19].

Анализ результатов, представленных в табл. 2, показывает, что содержание кварца в песке не единственный фактор, отражающий способность песков удерживать ионы. Эффективность удаления ионов никеля (II) из потока зависит от зернистости песка, степени однородности и кристаллохимических особенностей. Для мелкозернистого и однородного песка с высоким содержанием кварца удержание ионов никеля (II) на поверхности при одинаковой скорости вымывания повышается более чем в 30 раз, на втором месте стоит песок крупный, близкий по показателю однородности и с самым низким содержанием кварца. Очевидно, на поверхности зерен этого типа песка в силу природных особенностей оказывается большое количество кремния, который активен по отношению к кислотной активации.

Схожие закономерности получены в исследованиях адсорбции аммоний-ионов на дисперсном кремнеземе [24] и ионов некоторых тяжелых металлов на модифицированных алюмосиликатах [11].

В серии экспериментов с активированными песками показано, что увеличение расхода раствора приводит к линейному снижению эффективности удаления никеля (II) из песка. Проявление особенностей песков при извлечении ими ионов никеля (II) оценили по коэффициентам уравнения типа $y = a - bx$, где x – скорость стока через слой песка, y – эффек-

тивность удаления ионов металла. Для условий наших экспериментов уравнение имеет вид

$$R = R_0 - b \cdot W,$$

например, для песка с содержанием 98,99 мас. % SiO₂ уравнение имеет вид:

$$y = 97,218 - 24,74 \cdot x \text{ или}$$

$$R = 97,218 - 24,74 \cdot W \text{ при } R^2 = 0,9219.$$

Коэффициент a линейного уравнения представляется некоторой гипотетической величиной R_0 при нулевой скорости течения раствора W через слой песка. Коэффициент b важен, поскольку показывает степень снижения извлечения никеля (II) от скорости стока, его значения приведены в табл. 3. Коэффициенты достоверности аппроксимации для приведенных в таблице значений составляют $R^2 = 0,90 \div 0,99$.

Если у природных песков коэффициенты b не зависят от содержания кварца, то активирование песков соляной кислотой связано с ним. Коэффициенты закономерно убывают со снижением содержания кварца, а кроме того, попарно близки в двух группах песков. Это свидетельствует о том, что кислотное активирование проявляется на выходах кремния в кристаллической решетке на поверхности зерен песка.

Вместе с тем, с увеличением скорости пропускания рабочего раствора через колонку с активированными песками величина адсорбции

Таблица 3 / Table 3

Зависимость коэффициента b в уравнении $R = R_0 - b \cdot W$ от содержания кварца в песке
Dependence of the coefficient b in the equation $R = R_0 - b \cdot W$ of the quartz content in the sand

Условия / Criterion	Тип песка / The type of sand			
	П1 S1	П2 S2	П3 S3	П4 S4
SiO ₂ , мас. % / SiO ₂ , % by mas	98,99	98,38	89,93	89,11
Природные пески / Natural sands	24,74	3,38	7,82	9,40
Песок после обработки / Sand after processing	9,52	9,37	7,93	7,59

снижается неодинаково. Это отмечено другими авторами [23] и подтверждает сделанный ранее для природных песков вывод, что в процессе адсорбции ионов никеля (II) значимыми факторами являются такие свойства песков, как гранулометрия, объемная масса, степень однородности и др.

Высокое содержание SiO₂ является особенностью морского песка, этот песок неактивен в отношении длительной сорбции ионов никеля (II). Падение эффективности удаления ионов металла с повышением скорости стока через слой песка ($b = -24,742$) свидетельствует о том, что поверхность песка быстро насыщается, способность к сорбции снижается, а количество ионов никеля (II) в фильтрате растет.

Представления о центрах адсорбции и механизмах процессов на поверхности кремнезема разработаны к настоящему времени весьма подробно, однако разнообразие ситуаций настолько велико, что подобные исследования продолжают [25–27]. Природные пески как объекты горной породы, с точки зрения кристаллохимии, характеризуются простой кристаллической структурой, состоящей из оксидов алюминия и кремния. Однако в силу своего происхождения они проявляют некоторые морфологические особенности поверхности – имеют особые выступы, впадины и другие дефекты структуры реальных кристаллов (шероховатость, трещины, дислокации, ребра, выщерблены, сколы). Эти особенности поверхности в значительной степени влияют на результаты экспериментов. Но кроме зависимости адсорбции от особенностей геометрической упаковки атомов кристаллической решетки важными оказываются процессы структурирования со стороны раствора и «подгонка» ионов никеля (II) и молекул воды по отношению к адсорбционным центрам на

поверхности. Известно, что на некоторых типах поверхностей смежные с поверхностью молекулы воды могут принимать некоторую степень упорядоченности [21, 22, 28, 29].

Если твердое вещество имеет кристаллическую поверхность, на которой атомы расположены упорядоченно, то можно представить и упорядоченность в расположении адсорбированных молекул воды, которая в результате образования водородных связей может распространяться на некоторое расстояние от поверхности вглубь раствора. В кремнеземах регулярное расположение силоксановых и силанольных групп определяет типы центров адсорбции, однако специфика природного адсорбента (зернистость, степень однородности, дефекты рельефа и другие морфологические признаки) влияет на упорядоченность приповерхностного слоя, и поведение ионов никеля зависит от этого. В природных водах или техногенных стоках важно не только содержание металла, но и формы его присутствия, в частности, соотношение свободных и связанных форм металла. Истинно растворенные формы никеля весьма разнообразны, что связано со строением атома и проявляется в процессах гидролиза, гидролитической полимеризации (образованием полиядерных гидроксокомплексов) и комплексообразования с различными лигандами [30].

Результаты экспериментов свидетельствуют, что обработка соляной кислотой нативных песков приводит к тому, что проявляется качественно иная закономерность. Величина адсорбции становится зависимой от содержания кварца в песке, а значимость гранулометрии и однородности становится второстепенной. Для данного исследования содержание кварца в песке можно считать достаточно случайным. Однако это обстоятельство позволило выявить



интересное явление – соляная кислота влияет на структурирование поверхности, своеобразную перегруппировку силоксановых (свободных и связанных с водой) и силанольных связей, что отмечают и авторы [31]. В результате активизируются адсорбционные центры, которые взаимодействуют с ионами никеля (II), что приводит к повышению эффективности адсорбционного процесса.

Если ранее было показано, что взаимодействие ионов никеля (II) с поверхностью зёрен является сочетанием таких процессов, как адсорбция, ионный обмен, комплексобразование и осаждение труднорастворимых оксидов и гидроксокомплексов никеля (II) [17, 18], то из результатов настоящего исследования следует, что на модифицированной поверхности происходит перераспределение активных центров, благоприятное для протекания указанных процессов. Вполне вероятно также, что перераспределяется и вклад в суммарный эффект каждого из указанных одновременно протекающих стадий гетерогенного взаимодействия.

Результаты данного исследования позволяют оценить влияние кислотной обработки на способ удерживания ионов никеля (II) на поверхности песков в процессе адсорбции как благоприятное.

Заключение

Результаты экспериментов свидетельствуют о влиянии химической активации на повышение поглотительной способности природных песков при использовании их в качестве искусственных геохимических барьеров. Обработка песков соляной кислотой положительно влияет на процесс сорбции ионов никеля (II) на поверхности. Показано, что при фильтровании растворов степень удерживания ионов никеля (II) на поверхности песка, обработанного соляной кислотой, существенно повышается. При одинаковой скорости фильтрования ($1 \cdot 10^{-3}$ дм³/мин) и одинаковой высоте засыпки ($2,7 \pm 0,1$ см) возрастание эффективности удаления ионов никеля пропорционально содержанию кварца в песке и может достигать 30%. Эффективность удерживания никеля (II) предварительно обработанным песком пропорциональна скорости фильтрования, а темпы снижения ее коррелируют с содержанием кварца.

В статических условиях контакта модельного раствора с твердой фазой величины предельной адсорбции повышаются пропорционально доле SiO₂ в составе песка. Полученные результаты дают основание считать, что активное действие соляной кислоты проявляется преимущественно на связях, в которых участвует кремний, т. е. в силоксановых и силанольных группах, которые выступают как центры адсорбции.

Благоприятное влияние предварительной кислотной обработки связано, очевидно, с повышением адсорбционной активности силанольных и силоксановых групп за счет их перераспределения на поверхности.

Список литературы

1. Яковлева А. А., Нгуен Ч. Т. Пески Вьетнама как объект коллоидно-химических исследований // Проблемы земной цивилизации: сборник трудов I Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск : ИРНИТУ, 2018. С. 22–28.
2. Yiacoumi S., Chen J. Modeling of metal ion sorption phenomena in environmental systems // Adsorption and its Applications in Industry and Environmental Protection. Studies in Surface Science and Catalysis. 1999. Vol. 120. P. 285–317.
3. Соколова Т. А., Трофимов С. Я. Сорбционные свойства почв. Адсорбция. Катионный обмен. Тула : Гриф и К, 2009. 172 с.
4. Морарь Н. Н., Новосельцева Е. В. Изучение адсорбционных свойств природных глин и песка // Февральские чтения : материалы регион. науч.-практ. конф., посвящ. 55-летию высш. проф. лесного образования в Республике Коми : науч. электр. издание на компакт-диске. Сыктывкар : Сыктывкарский лесной институт, 2007. С. 163–165.
5. Никифоров А. Ф., Кутергин А. С., Низамова А. Ф., Фоминых И. М. Сорбция тяжелых цветных металлов из водных растворов зернистыми фильтрующими материалами на основе кремнистых пород // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. Т. 2. С. 92–108.
6. Климов Е. С., Бузаева М. В. Природные сорбенты и комплексоны в очистке сточных вод. Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 2011. 201 с.
7. Рубановская С. Г., Величко Л. Н. Сорбция ионов тяжелых металлов природными материалами // Известия вузов. Цветная металлургия. 2006. № 4. С. 37–39.
8. Баярова Ю. Л., Нестеров Д. П., Корнева Е. А., Светлов А. В., Макаров Д. В., Маслобоев В. А. Искусственные геохимические барьеры для решения экологических и технологических задач // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, № 3. С. 536–541.



9. Ланина Т. Д., Селиванова Е. С., Донин С. Н. Удаление тяжелых металлов из сточных вод методом сорбции // *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. 2015. № 5. С. 32–36.
10. Xing S., Zhao M., Ma Z. Removal of heavy metal ions from aqueous solution using red loess as an adsorbent // *J. Environ. Sci.-China*. 2011. Vol. 23, № 9. P. 1497–1502.
11. Макаров А. В., Синеговская Л. М., Корчевин Н. А. Физико-химические исследования процесса адсорбции ионов тяжелых металлов на модифицированных алюмосиликатах // *Вестник ИрГТУ*. 2013. Т. 73, № 2. С. 147–154.
12. Venkatesan G., Elangovan G., Bhuvaneswari K. Experimental studies on removal of nickel using foundry sand // *Journal of Environmental Biology*. 2016. Vol. 37. P. 355–360.
13. Дударева Г. Н., Иринчинова Н. В., Дударев В. И. Адсорбционное извлечение никеля(II) из водных растворов техногенного характера // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2020. Т. 10, № 1. С. 133–139.
14. Park J. H., Lee J. K. Weathered Sand of Basalt as a Potential Nickel Adsorbent // *Processes*. 2020. Vol. 10, № 8. P. 1–11.
15. Vakili M., Rafatullah M., Yuan J., Haider M. Z. Nickel ion removal from aqueous solutions through the adsorption process // *Reviews in Chemical Engineering*. 2021. Vol. 37, № 6. P. 755–778.
16. Yadav S., Srivastava V., Banerjee S., Gode F. Studies on the removal of nickel from aqueous solutions using modified riverbed sand // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2013. Vol. 20, № 1. P. 558–567.
17. Яковлева А. А., Нгуен Ч. Т. Роль адсорбционных характеристик песков в защите окружающей среды от загрязнения ионами никеля (II) // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2022. № 2. С. 182–193. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/922>
18. Яковлева А. А., Нгуен Ч. Т. Адсорбционные особенности природных песков по отношению к ионам никеля (II) // *Экология и природопользование: сборник трудов междунар. науч.-практ. конф. (Магас, 21–23 октября 2020 г.). Ингушетия, Назрань : ООО «КЕП», 2020. С. 83–88.*
19. 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>
20. Программа расчета параметров адсорбции. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021615655 Рос. Федерация / Яковлева А. А., Нгуен Ч. Т. ; правообладатель: ФГБОУ ВО «ИРНИТУ». 2021. 5 с.
21. Томашпольский Ю. Я. Сегрегационные явления на поверхности кристаллов химических соединений // *Журнал физической химии*. 2018. Т. 92, № 6. С. 871–882.
22. Цивадзе А. Ю. Структурная самоорганизация в растворах и на границе раздела фаз. М. : Изд-во ЛКИ, 2008. 544 с.
23. Стрельникова О. Ю., Ходосова Н. А., Бельчинская Л. И. Гранулометрический анализ природных и кислотномодифицированных алюмосиликатных сорбентов // *Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов : материалы III Всерос. науч. конф. с междунар. участием*. Иваново : Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2018. С. 209–211.
24. Кондрашова А. В. Адсорбция катиона аммония в динамическом режиме // *Инновационная наука*. 2015. Т. 4, № 3. С. 17–18.
25. Гамбург Ю. Д. Доля поверхностных атомов в наночастицах и критические зародыши новой фазы // *Журнал физической химии*. 2022. Т. 96, № 1. С. 96–100. <https://doi.org/10.31857/S0044453722010101>
26. Долгонос А. М. Проблемы теории ионного обмена. I. Особенности описания ионообменных сил в классических системах // *Журнал физической химии*. 2022. Т. 96, № 10. С. 1513–1519. <https://doi.org/10.31857/S0044453722100089>
27. Долгонос А. М. Проблемы теории ионного обмена. II. Селективность ионообменников // *Журнал физической химии*. 2022. Т. 96, № 11. С. 1659–1667. <https://doi.org/10.31857/S0044453722110085>
28. Израелашвили Д. Н. Межмолекулярные и поверхностные силы. М. : Научный мир, 2011. 456 с.
29. Ролдугин В. И. Физикохимия поверхности. Долгосрочный : Издательский Дом «Интеллект», 2011. 568 с.
30. Дроздов А. А., Зломанов В. П., Мазо Г. Н., Спиридонов Ф. М. Неорганическая химия : в 3 т. / под ред. Ю. Д. Третьякова. Т. 3 : Химия переходных элементов. Кн. 2. М. : Академия, 2007. 400 с.
31. Козлова С. А., Парфенов В. А., Тарасова Л. А., Курика С. Д. Состояние силанольного покрытия мезоструктурированного силикатного материала МСМ-41 в результате постсинтетической активации // *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. 2008. Vol. 4, № 1. P. 376–388.

Reference

1. Yakovleva A. A., Nguyen C. T. The sands of Vietnam as an object of colloidal chemical research. *Problemy zemnoy tsivilizatsii: sbornik trudov I Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Problems of Earthly Civilization: A collection of works of the First All-Russian scientific and practical conference]. Irkutsk, IRNITU Publ., 2018, pp. 22–28 (in Russian).
2. Yiaccoumi S., Chen J. Modeling of metal ion sorption phenomena in environmental systems. *Adsorption*



- and Its Applications in Industry and Environmental Protection. *Studies in Surface Science and Catalysis*, 1999, vol. 120, pp. 285–317.
3. Sokolova T. A., Trofimov S. Ia. *Sorbtsionnye svoistva pochv. Adsorbtsiia. Kationnyi obmen* [Sorption properties of soils. Adsorption. Cation exchange]. Tula, Grif i K, 2009. 172 p. (in Russian).
 4. Morar' N. N., Novosel'tseva E. V. Study of the adsorption properties of natural clays and sand. In: *Fevral'skiye chteniya: materialy region. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 55-letiyu vyssh. prof. lesnogo obrazovaniya v Respublike Komi: nauchn. elektr. izdaniye na kompaktdiske* [February Readings: Proceedings of the region. scientific and practical conf., dedicated to the 55th anniversary of higher professional forestry education in the Komi Republic. Electronic ed. on CD]. Syktyvkar, Syktyvkar Forestry Institute Publ., 2007, pp. 163–165 (in Russian).
 5. Nikiforov A. F., Kutergin A. S., Nizamova A. F., Fominikh I. M., Trifonov K. I. Heavy non-ferrous metals adsorption from water solutions with granular filtering materials based on silicon rock. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*, 2018, vol. 2, pp. 92–108 (in Russian).
 6. Klimov E. S., Buzaeva M. V. *Prirodnye sorbenty i kompleksy v oчитke stochnykh vod* [Natural sorbents and complexes in wastewater treatment]. Ul'yans'k, Ulyanovsk State Technical University Publ., 2011. 201 p. (in Russian).
 7. Rubanovskaia S. G., Velichko L. N. Sorption of heavy metal ions by natural materials. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*, 2006, no. 4, pp. 37–39 (in Russian).
 8. Baiurova Iu. L., Nesterov D. P., Korneva E. A., Svetlov A. V., Makarov D. V., Masloboev V. A. Artificial geochemical barriers for solving environmental and technological problems. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Natural Sciences*, 2013, vol. 16, no. 3, pp. 536–541 (in Russian).
 9. Lanina T. D., Selivanova E. S., Donin S. N. Removal of heavy metals from wastewater by sorption. *Vodoочистка. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*, 2015, no. 5, pp. 32–36 (in Russian).
 10. Xing S., Zhao M., Ma Z. Removal of heavy metal ions from aqueous solution using red loess as an adsorbent. *J. Environ. Sci-China*, 2011, vol. 23, no. 9, pp. 1497–1502.
 11. Makarov A. V., Sinegovskaia L. M., Korchevin N. A. Physico-chemical studies of heavy metal ions sorption by modified aluminium silicates. *Vestnik of Irkutsk State Technical University*, 2013, vol. 73, no. 2, pp. 147–154 (in Russian).
 12. Venkatesan G., Elangovan G., Bhuvaneswari K. Experimental studies on removal of nickel using foundry sand. *Journal of Environmental Biology*, 2016, vol. 37, pp. 355–360.
 13. Dudareva G. N., Irinchinova N. V., Dudarev V. I. Adsorption extraction of nickel (II) from industrial aqueous solutions. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 133–139 (in Russian).
 14. Park J. H., Lee J. K. Weathered sand of basalt as a potential nickel adsorbent. *Processes*, 2020, vol. 10, no. 8, pp. 1–11.
 15. Vakili M., Rafatullah M., Yuan J., Haider M. Z. and ather. Nickel ion removal from aqueous solutions through the adsorption process. *Reviews in Chemical Engineering*, 2021, vol. 37, no. 6, pp. 755–778.
 16. Yadav S., Srivastava V., Banerjee S., Gode F. Studies on the removal of nickel from aqueous solutions using modified riverbed sand. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2013, vol. 20, no. 1, pp. 558–567.
 17. Iakovleva A. A., Nguen Ch. T. The role of the adsorption characteristics of sands in environmental protection from contamination with nickel (II) ions. *Sorption and Chromatography Processes*, 2022, no. 2, pp. 182–193. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/922>
 18. Iakovleva A. A., Nguen Ch. T. Adsorption properties of natural sands in relation to nickel (II) ions. In: *Ekologiya i prirodopol'zovanie: sb. tr. mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. (Magas, 21–23 oktyabrya 2020 g.)*. [Ecology and Natural Management: Coll. works of Intern. sci.-prakt. conf. (Magas, October 21–23, 2020)]. Ingushetia, Nazran', OOO "KEP", 2020, pp. 83–88 (in Russian).
 19. Yakovleva A. A., Nguen 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>
 20. *Programma rascheta parametrov adsorbtsii: svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM № 2021615655 Ros. Federatsiya; A. A. Iakovleva, Ch. T. Nguen. pravoobladatel': FGBOU VO "IRNITU"* [Program for calculating adsorption parameters. Certificate of state registration of computer program No. 2021615655 Russian Federation, A. A. Iakovleva, Ch. T. Nguen. copyright holder, FYBOU YO "IRNTU"]. 2021. 5 p. (in Russian).
 21. Tomashpol'skii Iu. Ia. Segregation phenomena on the crystal surface of chemical compounds. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2018, vol. 92, no. 6, pp. 871–882 (in Russian).
 22. Tsivadze A. Iu. *Strukturnaia samoorganizatsiia v rastvorakh i na granitse razdela faz* [Structural self-organization in solutions and at the interface of phases]. Moscow, LKI Publ., 2008. 544 p. (in Russian).
 23. Strel'nikova O. Iu., Khodosova N. A., Bel'chinskaia L. I. Granulometric analysis of natural and acid-modified aluminosilicate sorbents. *Aktual'nyye problemy teorii i praktiki geterogennykh katalizatorov i adsorbentov: materialy III Vseros. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiyem* [Actual Problems of Theory and Practice of Heteroge-



- neous Catalysts and Adsorbents: Proceedings of the III All-Russian scientific conference with International participation]. Ivanovo, Ivanovo State University of Chemistry and Technology Publ., 2018, pp. 209–211 (in Russian).
24. Kondrashova A. V. Adsorption of ammonium cation in a dynamic mode. *Innovative Science*, 2015, vol. 4, no. 3, pp. 17–18 (in Russian).
25. Gamburg Yu. D. Fraction of surface atoms in the nanoparticles and critical nuclei of a new phase. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2022, vol. 96, no. 1, pp. 135–138 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0044453722010101>
26. Dolgonosov A. M. Problems of the theory of ion exchange I: Describing forces of ion exchange in classical systems. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2022, vol. 96, no. 10, pp. 1513–1519 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0044453722100089>
27. Dolgonosov A. M. Problems of the theory of ion exchange II: Selectivity of ion exchangers. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2022, vol. 96, no. 11, pp. 1659–1667 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0044453722110085>
28. Izraelashvili D. N. *Mezhmolekuliarnye i poverkhnostnye sily* [Intermolecular and surface forces]. Moscow, Nauchnyi mir, 2011. 456 p. (in Russian).
29. Roldugin V. I. *Fizikokhimiia poverkhnosti* [Physical chemistry of the surface]. Dolgoprudnyi, Izdatel'skii Dom "Intellekt", 2011. 568 p. (in Russian).
30. Drozdov A. A., Zlomanov V. P., Mazo G. N., Spiridonov F. M. *Neorganicheskaia khimiia: v 3 t. Pod red. Yu. D. Tret'yakova. T. 3 : Khimiia perekhodnykh elementov. Kn. 2* [Tretyakov Yu. D., ed. Inorganic Chemistry: in 3 vols. Vol. 3: Chemistry of transition elements. Book 2]. Moscow, Akademiia, 2007. 400 p. (in Russian).
31. Kozlova S. A., Parfenova V. A., Tarasova L. A., Kirika S. D. The state of silanol coverage of the mesostructured silicate material MCM-41 as a result of postsynthetic activation. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*, 2008, vol. 4, no. 1, pp. 376–388 (in Russian).

Поступила в редакцию 21.01.2024; одобрена после рецензирования 20.05.2024;
 принята к публикации 31.05.2024; опубликована 31.03.2025
 The article was submitted 21.01.2024; approved after reviewing 20.05.2024;
 accepted for publication 31.05.2024; published 31.03.2025