



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 544.7

doi: 10.17308/sorpchrom.2022.22/9223

Роль адсорбционных характеристик песков в защите окружающей среды от загрязнения ионами никеля (II)

Ариадна Алексеевна Яковлева[✉], Чунг Тхуй Нгуен

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

[✉]ayakovistu@mail.ru

Аннотация. Проведено исследование механизмов поверхностных явлений в системе «песок – техногенный сток» для определения их роли в ситуации загрязнения прибрежных зон ионами никеля (II). В качестве объектов исследования использованы прибрежные пески из экономически значимых районов Вьетнама. Эксперименты проведены на основе имитационного моделирования с использованием искусственно созданных техногенных стоков. Полученные результаты свидетельствуют, что степень удерживания ионов никеля (II) из водного раствора на поверхности зависит от скорости фильтрования раствора через слой песка и снижается по мере ее увеличения.

Эффект удаления ионов никеля (II) из потока и осаждение их на минеральных частицах зависит от зернистости песка, степени его однородности и кристаллохимических особенностей. Гранулометрические и кристаллохимические характеристики, в свою очередь, зависят от географических особенностей места отбора пробы. Морской песок, отобранный на берегу залива Бакбо (Южно-Китайское море), в составе которого находится практически чистый кварц, менее всего сорбирует ионы никеля. На поверхности речных песков условия сорбции ионов никеля (II) более благоприятны, однако у каждого песка проявляются свои особенности.

Анализ кинетических закономерностей показывает, что для описания механизма поверхностного процесса подходит модель псевдо-первого порядка, найденные значения энергии активации сорбции подчеркивает значимость диффузионных стадий процесса. Механизм поверхностного процесса, вероятно, включает адсорбцию и ионообмен между функциональными группами на поверхности песка и ионами никеля, и сопровождается образованием комплексов и осадков на поверхности песка. Предложена возможная схема стадий поверхностного процесса.

Для всех песков характерны необратимые взаимодействия, на поверхности минеральных частиц после десорбции всегда остается некоторое количество ионов никеля (II). Количественные показатели десорбции свидетельствуют, что по своим природным качествам исследуемые пески способны играть важную роль в процессах загрязнения прибрежных зон ионами никеля (II).

Ключевые слова: сорбция, фильтрование, ионы никеля, прибрежные пески, загрязнение, окружающая среда, экологический барьер

Для цитирования: Яковлева А.А., Нгуен Ч.Т. Роль адсорбционных характеристик песков в защите окружающей среды от загрязнения ионами никеля (II) // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2022. Т. 22, № 2. С. 183-192. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/9223>

Original article

The role of the adsorption characteristics of sands in environmental protection from contamination with nickel(II) ions

Ariadna A. Yakovleva[✉], Trung Thuy Nguyen

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

[✉]ayakovistu@mail.ru

Abstract. A study was performed of the mechanisms of surface phenomena in the "sand - technogenic runoff" system for the determination of their role in the pollution of coastal zones with nickel (II) ions. Coastal sands from economically significant areas of Vietnam were used as the objects of the study. The experiments were carried out based on simulation modelling using artificially created technogenic effluents.

The obtained results indicate that the degree of retention of nickel(II) ions from an aqueous solution on the surface depends on the rate of solution filtration through a layer of sand and decreases as it increases.

The effect of removing nickel(II) ions from the flow and depositing them on mineral particles depends on the grain size of the sand, its degree of homogeneity, and crystal chemical features. Granulometric and crystal-chemical characteristics, in turn, depend on the geographical features of the sampling site. Sea sand sampled on the coast of Bakbo Bay (South China Sea), which contains almost pure quartz is characterised by the lowest sorption of nickel ions. On the surface of river sands, the conditions for the sorption of nickel (II) ions are more favourable, but each sand has its own characteristics.

The analysis of the kinetic regularities shows that a pseudo-first-order model is suitable for describing the mechanism of the surface process, and the found values of the sorption activation energy emphasise the significance of the diffusion stages of the process. The mechanism of the surface process probably involves adsorption and ion exchange between functional groups on the sand surface and nickel ions, and is accompanied by the formation of complexes and deposits on the sand surface. A possible scheme for the stages of the surface process was proposed. All sands were characterized by irreversible interactions; a certain amount of nickel (II) ions always remained on the surface of mineral particles after desorption. Quantitative indicators of desorption indicate that, due to their natural qualities, the studied sands can play an important role in the processes of pollution of coastal zones with nickel(II) ions.

Keywords: sorption, filtration, nickel ions, coastal sands, pollution, environment, ecological barrier

For citation: Yakovleva A.A., Nguyen Ch.T. The role of the adsorption characteristics of sands in environmental protection from contamination with nickel(II) ions. *Sorbtionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2022. 22(2): 183-192. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/9223>

Введение

Процессы, происходящие в поверхностных слоях песчаных почв, имеют большое значение для природных систем, рек, озер, морей. Поэтому приобретают актуальность экологические аспекты сорбционных исследований таких природных объектов, как пески, которые привлекательны своими уникальными фильтрующими способностями. За счет различных механизмов удерживания поллютантов пески могут выступать в качестве естественных защитных барьеров. Изучение их свойств позволяет отыскивать новые подходы в решении вопросов разработки и совершенствования методов сохранности природных зон [1-7].

По ГОСТ России 17.4.1.02-83 выделено 2 класса тяжелых металлов и металлоидов по степени их опасности. Никель относится к классу умеренно опасных веществ, его присутствие в водной среде вызывает серьезную озабоченность из-за вредного воздействия на физиологию человека, водную флору и другие биологи-

ческие системы при превышении допустимых уровней. Согласно нормативу ГН 2.1.5.1315-03 ПДК никеля (II) в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования составляют 0.02 мг/дм³, по гигиеническому нормативу ГН 2.1.7.2041-06 величина ПДК никеля с учетом фона (показателя Кларка) в почве составляет 0.004 мг/г [8]. Во Вьетнаме предельный уровень загрязняющих веществ поверхностной воды для ионов никеля (II), установленный Министерством природных ресурсов и экологии, выше, чем в России, и составляет 0.1 мг/дм³ [9].

Целью работы является рассмотрение адсорбционных характеристик песков и их роли барьеров в защите окружающей среды от загрязнения ионами никеля.

Экспериментальная часть

Образцы песков для изучения адсорбционных характеристик были отобраны во Вьетнаме. Для упрощения они обозначены: песок А с берегов реки Хонга, песок Б – реки Тхубон; песок К – реки

Тхачхан и песок Г отобран на пляже залива Бакбо. Средний размер зерен песка и коэффициент однородности определены ситовым анализом [10]. Минеральная структура образцов песка охарактеризована рентгеновским дифрактометром на аппарате XRD-7000 Shimadzu (Япония). Для идентифицирования характера функциональных групп на поверхности песка проведен анализ ИК-Фурье спектров. Ранее образцы песка были использованы при изучении их способности к удерживанию ионов железа (III), поэтому некоторые их свойства (минералогические, фракционные и др.) представлены в работах [11, 12]. Пористость песков определена пикнометрически, удельную поверхность $S_{уд}$ рассчитывали по уравнению метода БЭТ после адсорбции метиленового голубого.

Для приготовления модельных растворов, имитирующих техногенные стоки, использовали препарат $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ марки «ЧДА» ГОСТ 4038-79 фирмы «Черкасский завод химреактивов». Раствор $NiCl_2$ 12.75 мг/дм³ приготовлен растворением навески кристаллогидрата хлористого никеля в воде. Исследования адсорбции ионов никеля (II) из водных растворов на песках проводили в динамическом и статическом режимах.

В динамических условиях навеску песка массой 3.0 г всыпали в колонку диаметром 0.01 м через воронку для получения фильтрующего слоя достаточно равномерного и рыхлого сложения. Через слой песка пропускали 0.025 дм³ рабочего раствора никеля (II), фильтрат собирали в чистую колбу для аналитической оценки. Скорость потока контролировали с помощью специального блока зажима-регулятора. При десорбции проводили многократное промывание песка в колонке, всякий раз используя 0.025 дм³ дистиллированной воды и контролируя состав фильтрата после каждого промывания.

Статический режим был обеспечен постоянным перемешиванием конических

колб с суспензиями в специальном встряхивателе с водяной баней Shaker type- 357 (Польша). Перемешивание с постоянной скоростью 200±50 об/мин длилось от 15 до 210 мин. Опыты проводили при трех температурах: 288±1; 298±1 и 308±1 К. Масса песка в каждой колбе составляла 3.0 г, объем рабочего раствора – 0.025 дм³. При десорбции в тех же условиях опытов также проводили неоднократное промывание песка 0.025 дм³ дистиллированной воды.

Величину адсорбции ионов никеля (II) A (мг/г) в статических условиях и эффективность удаления R (%) в динамических условиях определяли сходным образом:

$$A = \frac{C_0 - C}{m} \cdot V, \quad (1)$$

$$\text{и } R = \frac{C_0 - C}{C_0} \cdot 100, \quad (2)$$

где C_0 – начальная концентрация ионов никеля (II) в растворе, мг/дм³; V – объем рабочего раствора, дм³; m – масса адсорбента, г; C – концентрация раствора после фильтрования суспензии для формулы (1) и на выходе раствора из колонки для формулы (2).

За различные промежутки времени величину адсорбции A_t рассчитывали по формуле (1) с учетом концентрации раствора C_t , достигнутой ко времени t .

Механизм адсорбционного процесса исследован методом подбора кинетических моделей, наиболее характерных для сорбционного процесса на минеральных адсорбентах [13-19]:

- для первого порядка это модель Лагергена: $\frac{dA}{dt} = k_1(A_\infty - A_t)$;

- для второго порядка – модель Хо и Маккей: $\frac{dA}{dt} = k_2(A_\infty - A_t)^2$,

где $\frac{dA}{dt}$ – скорость адсорбции; k_1 – константа скорости псевдо-первого порядка, 1/мин; k_2 – константа скорости псевдо-второго порядка, г/(мг·мин); A_∞ – предельная величина адсорбции при достижении равновесного состояния.

Концентрацию ионов никеля (II) определяли по ПНД Ф 14-1.4-96 фотометрированием проб с диметилглиоксимом на приборе ПЭ-5400В фирмы ПРОЭКОЛАБ (Россия). Калибровочный график получен для серии исходных растворов при длине волны $\lambda=460$ нм.

Оценка погрешности проведена на всех этапах адсорбционных исследований. Для снижения ошибок проводили параллельные опыты и анализ выборочных данных при усреднении результатов. Каждое измерение оптической плотности повторяли до 5 раз, значения концентраций представляют собой усредненные из совокупности значения (грубые отклонения практически отсутствовали). Погрешность, обусловленная процедурой приготовления растворов для градуировки, не превышает 2.5%. Для графической обработки экспериментальных данных в работе использовали программу Microsoft Excel.

Обсуждение результатов

Влияние скорости фильтрации на степень извлечения ионов никеля (II) представлено на рис. 1. Судя по рис. 1, извлечение ионов никеля (II) линейно зависит от скорости фильтрации и если для каждой из этих зависимостей подобрать аппроксимирующее уравнение вида $R = a - bv$, то его коэффициенты можно использовать для анализа, поскольку они зависят от типа песка. При

этом коэффициент a представляет некоторую гипотетическую эффективность удаления ионов металла при нулевой скорости потока через слой песка. Более значимым оказывается коэффициент b , отражающий наклон графика или пропорциональность зависимости извлечения ионов металла от скорости стока (табл. 1).

Как видно из табл. 1, наклоны графиков для песков А, Б, Г и К существенно отличаются друг от друга, коэффициент b оказывается наибольшим у песка Г, т.е. удерживание ионов никеля (II) слоем песка Г снижается существенно при увеличении скорости потока. За счет этого появляется пересечение линий и если при небольших скоростях качество удерживания ионов металла у песков проявляется в последовательности $A < B < G < K$, то при увеличении расхода последовательность изменяется в ряду $A < B < K < G$.

Приведенные результаты показывают, что удерживание ионов никеля (II) на поверхности зависит не только от скорости фильтрации, но и от природных свойств песков. Анализ минералогического состава и гранулометрических параметров песков позволяет объяснить разницу сорбционных свойств (табл. 2).

Очевидно, что песок А обладает устойчивой адсорбционной способностью благодаря высокому содержанию SiO_2 и сравнительно небольшой зернистости. Пески Б и К – это крупнозернистые пески, в своем составе имеющие до 10-11% (мас.) $\alpha-Al_2O_3$. Как следствие, они

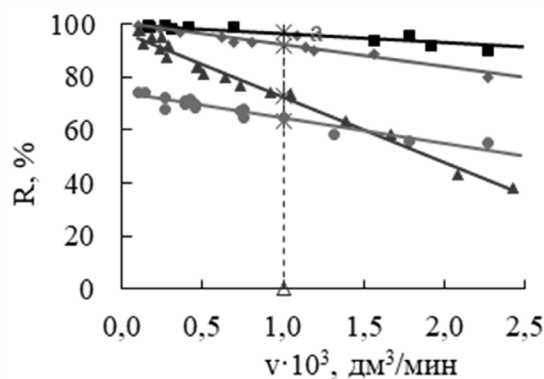


Рис. 1. Эффективность удаления ионов никеля (II) в слое песка: ■ – А; ◆ – Б; ▲ – Г; ● – К
 Fig. 1. Efficiency of removing nickel(II) ions in the sand layer: ■ – A; ◆ – B; ▲ – D; ● – J

Таблица 1. Взаимосвязь адсорбции ионов никеля (II) с типом песка

Table 1. Correlation between the adsorption of nickel(II) ions and the type of sand

Песок	Уравнение графика	R ²
А	R = 99.747 - 3.3814v	0.9343
Б	R = 100.3 - 8.2734v	0.9003
Г	R = 97.218 - 24.742v	0.9219
К	R = 74.491 - 10.769v	0.9133

Таблица 2. Характеристика песков

Table 2. Characteristics of the sands

Песок	А	Б	Г	К
Пористость, %	50.192	51.340	49.474	50.577
S _{уд} , м ² /г	1.003	0.990	1.017	0.956
Степень однородности, %	53.125	72.240	66.919	66.919
Средний размер частиц, мм	0.294	0.429	0.241	0.849
Содержание α-SiO ₂ , масс. %	98.38	89.93	98.99	89.11

обладают меньшей удельной поверхностью и иными сорбционными качествами.

Особенностью морского песка Г является не только высокое содержание SiO₂, но и сочетание тонкозернистости и однородности, что, очевидно, обеспечивает особую микрогеометрию поверхности контакта, в определенных условиях активной для сорбционного процесса. Однако, как подтвердили опыты с перемешиванием, в условиях турбулизации активность этого песка в отношении сорбции ионов никеля (II) изменяется. Стремительное падение зависимости по рис. 1 свидетельствует о том, что поверхность песка Г быстро насыщается, способность к сорбции снижается, а количество ионов никеля (II) в фильтрате растет.

На рис. 2 представлена для примера эволюция сорбционного процесса для ионов никеля (II) при температуре 308 К (при других температурах зависимости аналогичны), изотермы морского песка на всех графиках обособлены. Результаты опытов свидетельствуют, что предельная величина сорбции A_∞ достигается в среднем за 150-180 мин от начала опыта для всех песков.

Судя по рис. 2, предельная величина A_∞ оказывается зависимой от температуры и в первом приближении может служить аналогом константы скорости процесса в уравнении Аррениуса, что важно при кинетическом анализе. В этом случае при графической интерпретации зависимость приобретает вид прямой A_∞ = f(1/T) с углом наклона -E_a/R, а найденная

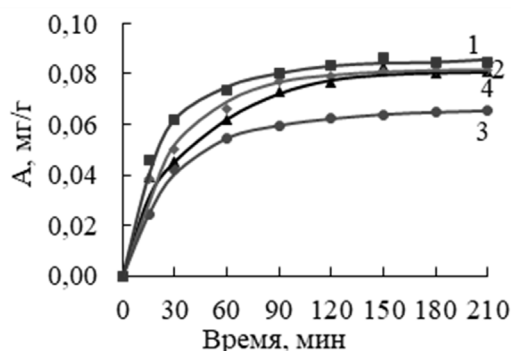


Рис. 2. Кинетические кривые адсорбции ионов никеля (II) при 308 К на песках: 1 – А; 2 – Б; 3 – Г; 4 – К

Fig. 2. Kinetic curves of adsorption of nickel(II) ions at 308 K on sands: 1 – A; 2 – B; 3 – D; 4 – J

Таблица 3. Сравнение значений энергии активации адсорбции
Table 3. Comparison of adsorption activation energy values

Песок	E_a , кДж/моль		
	по A_{∞}	по k_1	по k_2
А	12.63±0.60	11.72±0.93	1.91±0.61
Б	23.93±2.08	16.42±1.22	7.87±0.70
Г	4.66±1.21	9.76±1.23	54.94±2.93
К	11.13±0.91	16.60±1.65	15.54±1.68

при этом энергия активации является важной эмпирической характеристикой.

В табл. 3 приведены кажущиеся энергии активации, полученные подстановкой констант скорости адсорбции по варианту первого и второго порядков в уравнение Аррениуса $k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$. Во всех случаях уравнение псевдо-первого порядка оказывается предпочтительным, поскольку R^2 -коэффициент подтверждает достоверность линейной аппроксимации данных. В пользу модели псевдо-первого порядка говорит и близость с энергией активации, оцененной по предельной адсорбции.

Экспериментальные E_a , рассчитанные подстановкой в уравнение Аррениуса констант скорости первого порядка, в целом имеют меньшие отклонения от величин, определенных из адсорбционных показателей.

Энергии активации процесса сорбции ионов железа (III) на используемых песках, найденные ранее, находятся в хорошем соответствии с представляемыми результатами, например, энергия активации сорбции ионов железа (III) для песка Б

$E_a=17.6\pm 0.5$, для песка К – 19.01 ± 1.0 кДж/моль [11].

Невысокие значения экспериментально определенных энергий активации и первый порядок реакции исключают химическое взаимодействие как лимитирующую стадию и вполне соответствуют величинам, характерным для ионного обмена, например, схожие величины характеризуют ионообмен в растворах Pb^{2+} ($E_a=14.0\pm 0.6$ кДж/моль) или в растворах Hg^{2+} ($E_a=9.0\pm 1.2$ кДж/моль) [20].

Полученные значения энергии активации свидетельствуют о значимости диффузионной составляющей в общей картине процесса и не исключают обменных взаимодействий ионов никеля (II) с функциональными группами на поверхности песка [5]. На рис. 3 представлены результаты промывания песков в серии, когда предшествующее пропускание солевого раствора с небольшими скоростями обеспечивало максимальное заполнение поверхности зерен.

После 2-3 промываний ионы никеля (II) выщелачиваются водой незначительно, что свидетельствует о достаточно прочном удерживании, возможном при

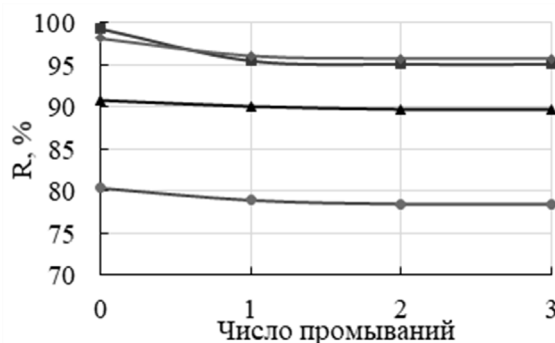


Рис. 3. Десорбция ионов никеля (II) в слое песка: ■ – А; ◆ – Б; ▲ – Г; ● – К
Fig. 3. Desorption of nickel(II) ions in a layer of sand: ■ – A; ◆ – B; ▲ – D; ● – J

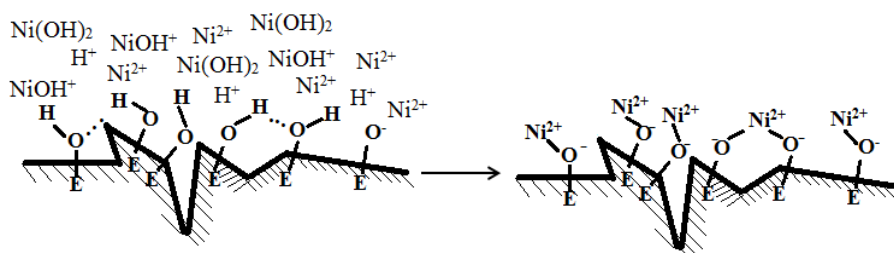
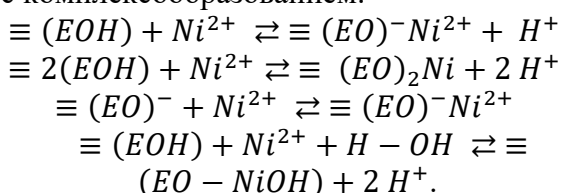


Рис. 4. Взаимодействие между функциональными группами и ионами никеля (II)
 Fig. 4. The process of interaction between functional groups and nickel (II) ions

вхождении ионов в двойной электрический слой на поверхности. На наш взгляд, совокупность полученных данных (невысокие энергии активации и остаточное количество ионов металла на поверхности после десорбции) может служить доказательством обменной сорбции и позволяет оценить способ удерживания ионов никеля (II) на поверхности песков.

С учетом склонности никеля (II) к комплексообразованию, возможно предположить так же совмещение ионного обмена с комплексообразованием:



В водных растворах поверхность зерен изучаемых песков энергетически неоднородна за счет присутствия различных функциональных групп (–ОН, SiO–, AlO– и т.д.). Механизм происходящего адсорбционного процесса на такой поверхности можно представить как взаимодействие за счет адсорбционных сил – дисперсионного, ориентационного и индукционного эффектов. Кроме того, возможно взаимодействие свободных ионов никеля (II) из раствора с функциональными (преимущественно –ОН) группами на поверхности песка по принципу ионного обмена. Литературные данные подтверждают, что большая часть ионов никеля (II) именно так и адсорбируются на поверхности песка [21, 22]. Процесс ионообмена, вероятно, происходит между свободными ионами или комплексами гидроксидов никеля с функциональными

группами на поверхности песка (рис. 4), однако для окончательного вывода и подтверждения предположений необходимы более детальные исследования.

Заключения

Полученные результаты свидетельствует, что степень удерживания ионов никеля (II) из водного раствора на поверхности песка зависит от скорости фильтрования раствора через слой песка и снижается по мере ее увеличения.

Эффект удаления ионов никеля (II) из потока и осаждение их на минеральных частицах зависит от зернистости песка, степени его однородности и кристаллохимических особенностей. Поглотительные качества морского песка несколько отличаются от показателей остальных песков, что связано, очевидно, с его мономинеральностью (в составе практически чистый кварц). На поверхности речных песков условия адсорбции никеля (II) более благоприятны, однако для всех песков без исключения характерны необратимые взаимодействия. На поверхности минеральных частиц всегда остается некоторое количество ионов никеля.

Анализ кинетических закономерностей сорбции показывает, что для описания механизма поверхностного процесса необходимо использовать модель псевдопервого порядка. Значения энергии активации сорбции подчеркивают значимость диффузионных стадий процесса. Механизм процесса адсорбции ионов никеля (II), вероятно, включает взаимодействие и ионообмен между функциональными группами на поверхности песка и ионами



никеля, сопровождается электростатическим взаимодействием и образованием комплексов и осадков на поверхности песка.

Предложен механизм взаимодействия функциональных групп на поверхности песка с ионами никеля (II), включающий ионообменный процесс, электростатическое притяжение, комплексообразование и осаждение.

Результаты свидетельствуют, что исследуемые пески являются активными участниками сорбционных процессов в

ситуации загрязнения прибрежных зон ионами никеля (II) и по своим природным качествам способны играть важную роль в создании экологических барьеров.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. 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.

2. Никифоров А.Ф., Кутергин А.С., Низамова А.Ф., Фоминых И.М., Трифонов К.И. 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.

3. Природные сорбенты и комплексоны в очистке сточных вод / под ред. Е.С. Климова. Ульяновск. УлГТУ. 2011. 201 с.

4. El Haouti R., Anfar Z., Et-taleb S., Benafqir M., Lhanafi S., Alem N. Removal of heavy metals and organic pollutants by a sand rich in iron oxide // *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*. 2018. Vol. 3. P. 1-11.

5. Benjamin M.M., Sletten R.S., Bailey R.P., Bennett T.orption and filtration of metals using iron-oxide-coated sand // *Water Res.* 1996. Vol. 30. no. 11. P. 2609-2620.

6. Hubicki Z., Kołodyńska D. Ion Exchange Technologies. Chapter 8: Selective removal of heavy metal ions from waters and waste waters using ion exchange methods.

Ion Exchange Technologies. 2012. P. 193-240.

7. 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.

8 Водяницкий Ю.Н. Тяжелые металлы и металлоиды в почвах. М. ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАСХН. М. ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАСХН. 2008. 86 с.

9. QCVN 08-MT:2015/BTNMT / National technical regulation on surface water quality. – Hanoi: Ministry of Natural Resources and Environment Vietnam. 2015. 13 p.

10. Яковлева А.А., Нгуен Ч.Т. Расчет среднего размера частиц и коэффициента однородности прибрежных песков, основанный на результатах ситового анализа // *Молодежный вестник ИрГТУ*. 2020. Т. 10. № 4. С. 69-75.

11. 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. 1-6.

12. Яковлева А.А., Нгуен Ч.Т. К вопросу о барьерных качествах песков Северного и Центрального Вьетнама. Сорбция ионов железа (III) // *Рос.хим.ж.* 2020. Т. 64. № 2. С. 80-84.

13. Ho Y.S., McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes // *Process biochemistry*. 1999. Vol. 34. P. 451-465.



14. Ho Y.S. Review of second-order models for adsorption systems // *J. Hazard. Mater.* 2006. Vol. 136. no. 3. P. 681-689.
15. Тимофеев К.Л., Мальцев Г.И., Свиридов А.В. Кинетика сорбции ионов индия, железа и цинка на модифицированном монтмориллоните // *Вестн. Моск. Ун-та. Сер.2.Химия.* 2017. Т. 58. № 3. С. 135-143.
16. Thajeel A.S. Isotherm, kinetic and thermodynamic of adsorption of heavy metal ions onto local activated carbon // *Aquatic Science and Technology.* 2013. Vol. 1. no. 2. P. 53-77.
17. Azizian S. Kinetic models of sorption: a theoretical analysis // *J. Colloid Interf. Sci.* 2004. Vol. 276. no. 1. P. 47-52.
18. Сютлова Е.А., Джигола Л.А. Исследование кинетических закономерностей твердофазного концентрирования ионов кальция природными сорбентами // *Сорбционные и хроматографические процессы.* 2020. Т. 20. № 1. С. 64-78.
19. Рамазанов А.Ш., Есмаил Г.К., Свешникова Д.А. Кинетика и термодинамика сорбции ионов тяжелых металлов на монтмориллонит содержащей глине // *Сорбционные и хроматографические процессы.* 2015. Т. 15. № 5. С. 672-682.
20. Кокотов Ю.А., Пасечник В.А. Равновесие и кинетика ионного обмена. Л. Химия. 1960. 336 с.
21. Ait Ahsaine H., Zbair M., El haouti R. Mesoporous treated sewage sludge as outstanding low-cost adsorbent for cadmium removal // *Desalin. Water Treat.* 2017. Vol. 85. P. 330-338.
22. 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. P. 1497-1502.
- 21(2): 265-275. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2021.21/3360>. (In Russ.).
2. Nikiforov A.F., Kutergin A.S., Nizamova A.F., Fominyh I.M., Trifonov K.I., Sorption of heavy non-ferrous metals from aqueous solutions with granular filter materials based on siliceous rocks. *Vodnoe hozjajstvo Rossii: problemy, tehnologii, upravlenie.* 2018; 2: 92-108. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2018-2-7>. (In Russ.).
3. Prirodnye sorbenty i kompleksy v oчитке stochnyh vod / Pod red. E.S. Klimova. Ul'janovsk. UIGTU. 2011. 201 p. (In Russ.).
4. El Haouti R., Anfar Z., Et-taleb S., Benafqir M., Lhanafi S., Alem N., Removal of heavy metals and organic pollutants by a sand rich in iron oxide. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration.* 2018; 3: 1-11. <https://doi.org/10.1007/s41207-018-0058-9>.
5. Benjamin M.M., Sletten R.S., Bailey R.P., Bennett T. Sorption and filtration of metals using iron-oxide-coated sand. *Water Res.* 1996; 30(11): 2609-2620. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(96\)00161-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(96)00161-3).
6. Hubicki Z., Kołodyńska D. Ion Exchange Technologies. Chapter 8: Selective removal of heavy metal ions from waters and waste waters using ion exchange methods. *Ion Exchange Technologies.* 2012; 193-240.
7. Dudareva G.N., Irinchinova N.V., Dudarev V.I., Adsorption extraction of nickel (II) from industrial aqueous solutions. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya.* 2020; 10(1): 133-139. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-133-139> (In Russ.).
8. Vodjanickij Ju.N. Tjzhelye metally i metalloidy v pochvah. M. GNU Pochvennyj institut im. V.V. Dokuchaeva RASHN. M. GNU Pochvennyj institut im. V.V. Dokuchaeva RASHN. 2008. 86 p. (In Russ.).
9. QCVN 08-MT:2015/BTNMT / National technical regulation on surface water quality. Hanoi: Ministry of Natural Resources and Environment Vietnam. 2015. 13 p.

References

1. Gorbunova N.S., Gromovik A.I., Cherepuhina I.V., Terent'eva Ju.Ju., Sorption processes in soils. Study issues and the current state of the problem // *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy.* 2021;



10. Yakovleva A.A., Nguyen T.T., Calculation of the average particle size and uniformity coefficient of coastal sands based on the results of sieve analysis. *Molodezhnyy vestnik IrGTU*. 2020; 10(4): 69-75. (In Russ.).
11. Yakovleva A.A., Nguyen T.T., Characteristics of Sorption on Surfaces of River Sands with the Participation of Iron(III) Ions. *Zhurnal fizicheskoy khimii*. 2021; 95(6): 1-6. <https://doi.org/10.31857/S0044453721060285>. (In Russ.).
12. Yakovleva A.A., Nguyen T.T., To the question of the barrier qualities of the sands of northern and central Vietnam. Sorption of iron (III) ions. *Rossiyskiy khimicheskij zhurnal*. 2020; 64(2): 80-84. <https://doi.org/10.6060/rcj.2020642.12>. (In Russ.).
13. Ho Y.S., McKay G., Pseudo-second order model for sorption processes. *Process biochemistry*. 1999; 4: 451-465.
14. Ho Y.S., Review of second-order models for adsorption systems. *J. Hazard. Mater.* 2006; 136(3): 681-689. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.12.043>.
15. Timofeev K.L., Mal'cev G.I., Sviridov A.V., The kinetics of sorption of ions of indium, iron and zinc on a modified montmorillonite. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 2. Khimija*. 2017; 58(3): 135-143. (In Russ.).
16. Thajeel A.S., Isotherm, kinetic and thermodynamic of adsorption of heavy metal ions onto local activated carbon. *Aquatic Science and Technology*. 2013; 1(2): 53-77. <https://doi.org/10.5296/ast.v1i2.3763>.
17. Azizian S. Kinetic models of sorption: a theoretical analysis. *J. Colloid Interf. Sci.* 2004; 276(1): 47-52. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.03.048>.
18. Sjutova E.A., Dzhigola L.A., Research of the kinetic regularities of calcium ions solid-phase concentration by natural sorbents. *Sorbtionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2020; 20(1): 64-78. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2020.20/2381>. (In Russ.).
19. Ramazanov A.Sh., Esmail G.K., Sveshnikova D.A. Kinetics and thermodynamics of sorption of heavy metal ions on montmorillonite-containing clay. *Sorbtionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2015; 15(5): 672-682. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2015.15/320>. (In Russ.).
20. Kokotov Yu.A., Pasechnik V.A. Equilibrium and kinetics of ion exchange. *L. Chemistry*. 1960. 336 p.
21. Ait Ahsaine H., Zbair M., El haouti R. Mesoporous treated sewage sludge as outstanding low-cost adsorbent for cadmium removal. *Desalin. Water Treat.* 2017; 85: 330-338. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21310>.
21. 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; 23(9): 1497-1502. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60581-5](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60581-5).

Информации об авторах / Information about the authors

А.А. Яковлева – д.т.н., профессор; кафедра химии и пищевой технологии им. проф. В.В. Тутуриной, Иркутск, Российская Федерация

Ч.Т. Нгуен Чунг Тхуй – аспирант, кафедра химии и пищевой технологии им. проф. В.В. Тутуриной, Иркутск, Российская Федерация

A.A. Yakovleva – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of chemistry and food technology, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: ayakovleva@mail.ru

T.T. Nguyen – post-graduate, Department of chemistry and food technology, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: nguyentrungthuy_irk@mail.ru

Статья поступила в редакцию 01.09.2021; одобрена после рецензирования 17.02.2022; принята к публикации 25.02.2022.

The article was submitted 01.09.2021; approved after reviewing 17.02.2022; accepted for publication 25.02.2022.