



Равновесные и термодинамические характеристики адсорбции катионов марганца, кобальта, никеля и цинка на природном сорбенте

Л. А. Пимнева¹, И. Н. Полещук¹, А. А. Решетова¹, Е. Л. Усова¹

¹Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия, e-mail: pimnevala@tyuiu.ru

Поступила в редакцию: 06.04.2026 г.; после доработки: 25.05.2026 г.; принята в печать: 27.05.2026 г.

Аннотация – Сорбционной способностью обладают не только синтетические ионообменники, но и природные сорбенты. Методом статической сорбции изучен механизм сорбционной активности природного сорбента (каолинита), месторождением которого является г. Кыштым Челябинской области. Для определения химического состава исследуемого сорбента применяли рентгеноструктурный анализ (РСА). Сорбционные процессы проводили при температурах 298 К, 318 К, 333 К. Полученные изотермы сорбции были обработаны на основе моделей Ленгмюра, Фрейндлиха, Темкина и Дубинина-Радушкевича. Показано, что модель Ленгмюра хорошо описывает сорбцию исследованных ионов на основе высоких коэффициентов детерминации (0,999). С использованием констант Фрейндлиха проведено сравнение активности сорбированных ионов. По модели Темкина показано снижение теплоты сорбции частиц по мере заполнения слоя. По модели Дубинина-Радушкевича рассчитана свободная энергия адсорбции. Для объяснения механизма сорбционного процесса приведен расчет термодинамических функций ΔG^0 , ΔH^0 , ΔS^0 . Дана оценка сорбционных свойств каолинита в статических условиях по отношению к ионам тяжелых металлов: Mn^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} .

Ключевые слова: сорбция, ионы марганца, кобальта, никеля, цинка, каолинит, равновесие, термодинамика

Technologies for elimination of chemical hazards

Equilibrium and thermodynamic characteristics of the adsorption of manganese, cobalt, nickel and zinc cations on a natural sorbent

Lyudmila A. Pimneva¹, Irina N. Poleshchuk¹, Antonina A. Reshetova¹, and Elena L. Usova¹

¹Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia, E-mail: pimnevala@tyuiu.ru

Received: April 4, 2026; Revised: May 25, 2026; Accepted: May 27, 2026

Abstract – The article presents the results of a study of sorption processes on a natural sorbent (kaolinite) from the Kyshtym deposit in the Chelyabinsk region. The chemical composition of kaolinite was studied by X-ray diffraction analysis. Sorption processes were carried out at

temperatures 298 K, 318 K, 333 K. The obtained isotherms were processed using the Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin-Radushkevich models. It is shown that the Langmuir model describes the studied ions well based on high determination coefficients (0,999). Based on Freundlich constants, a comparison of the activity of sorbed ions is given. According to Temkin's model, a decrease in the heat of sorption of particles is shown as the layer fills. The free energy of adsorption was calculated using the Dubinin-Radushkevich model. To explain the mechanism of the sorption process, a calculation of thermodynamic functions is given ΔG^0 , ΔH^0 , ΔS^0 . An assessment of the sorption properties of kaolinite under static conditions in relation to heavy metal ions is given: Mn^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} .

Keywords: sorption, manganese, cobalt, nickel and zinc ions, kaolinite, equilibrium, thermodynamics.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных источников негативного влияния на экологическую ситуацию природных вод является распространение токсичных примесей в водных средах. Особо опасны токсичные природные и сточные воды с повышенным содержанием ионов тяжелых металлов. В водную среду ионы тяжелых металлов поступают различными путями, но значительный вклад в загрязнение природных вод вносит деятельность человека [1].

В настоящее время для очистки сточных вод промышленных предприятий применяют различные методы:

- *электрохимические* проводят в электролизерах с активными и инертными электродами. Этим методом извлекают металлы, которые используют в различных производствах. Такие методы являются энергоемкими, дорогостоящими и сложными в применении.
- *реагентные* методы переводят металлы в осадок (гидроксиды, карбонаты, сульфиды, силикаты, фосфаты), что способствует образованию большого количества отходов.
- *сорбционные* представляют процесс поглощения вещества на границе раздела фаз. При физическом виде сорбции происходит поглощение на твердой или жидкой поверхности (адсорбция) или по всему объему сорбента (абсорбция). При хемосорбции происходит химическое взаимодействие сорбента с поглощаемым веществом. Сорбционный способ является технологически простым для удаления тяжелых металлов.

Сорбционный способ является одним из эффективных и продуктивных способов очистки [2, 3]. Различные глинистые минералы, которые находятся в недрах Уральского региона, обладают сорбционной способностью. Глинистыми минералами являются слоистые алюмосиликаты, которые находят применения для очистки водных объектов от различных загрязнений. Алюмосиликаты обладают уникальными свойствами: избирательностью, достаточной обменной емкостью, ионным обменом. При этом глинистые минералы имеют низкую стоимость и доступны в природе. В работе приведены результаты исследования статической сорбционной активности каолинита по отношению к ионам тяжелых металлов: Mn^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} .

Целью настоящего исследования являлось изучение равновесных и термодинамических характеристик сорбционных процессов, а также оценка потенциала использования природного сорбента каолинита для эффективного удаления ионов марганца, кобальта, никеля и цинка из водных систем.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследуемый сорбент (каолинит) находился в измельченном состоянии. По внешнему виду частицы каолинита выглядят как чешуйки белого цвета. Предварительно сорбент разделяли на фракции: 0,025–0,035 см. Насыпная плотность сорбента составляла 1316 кг/м³, а водопоглощение – 2,7%.

Для определения химического состава каолинита применяли рентгеноструктурный анализ (РСА), используя сканирующий растровый микроскоп JEOLJSM 6510 LV (Япония). Рентгеноструктурный анализ (РСА) показал следующий состав каолинита: SiO₂ – 49,22%; Al₂O₃ – 46,87%; Fe₂O₃ – 1,21%; Na₂O – 0,13%; K₂O – 0,42%; CaO – 0,86%; TiO₂ – 0,97%.

Статическим методом изучали влияние температуры на адсорбцию. При определении концентрации адсорбированных ионов предварительно определяли время установления равновесия в системе каолинит – раствор солей марганца, кобальта, никеля и цинка. Навеску адсорбента массой в 1 г помещали в 50 мл раствора соли с заданной концентрацией. Растворы перемешивали с целью установления сорбционного равновесия в течение 60 мин. Скорость перемешивания составляла 200 об/мин. Опыты проводили при температурах 298К, 318К, 333К.

Эксперименты повторяли трижды. Статистическая обработка полученных данных проводилась с применением критерия Стьюдента. Средняя квадратичная ошибка не превышала 5%. Анализ раствора на содержание ионов марганца, кобальта, никеля и цинка проводили комплексонометрическим титрованием.

Статическую адсорбционную емкость сорбента (А) вычисляли по формуле:

$$A = \frac{(C_0 - C_{\text{равн.}}) \cdot V}{m},$$

где А – обменная емкость, ммоль/г; C₀ – исходная концентрация ионов металлов, ммоль/мл; C_{равн.} – концентрация катиона металла при равновесии, ммоль/мл; V – объем раствора, мл; m – масса сорбента, г.

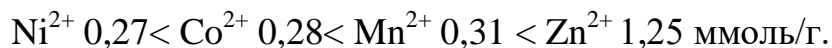
На основе расчетных данных были построены изотермы, которые в дальнейшем обрабатывались по моделям Ленгмюра, Фрейндлиха, Темкина и Дубинина-Радускевича.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

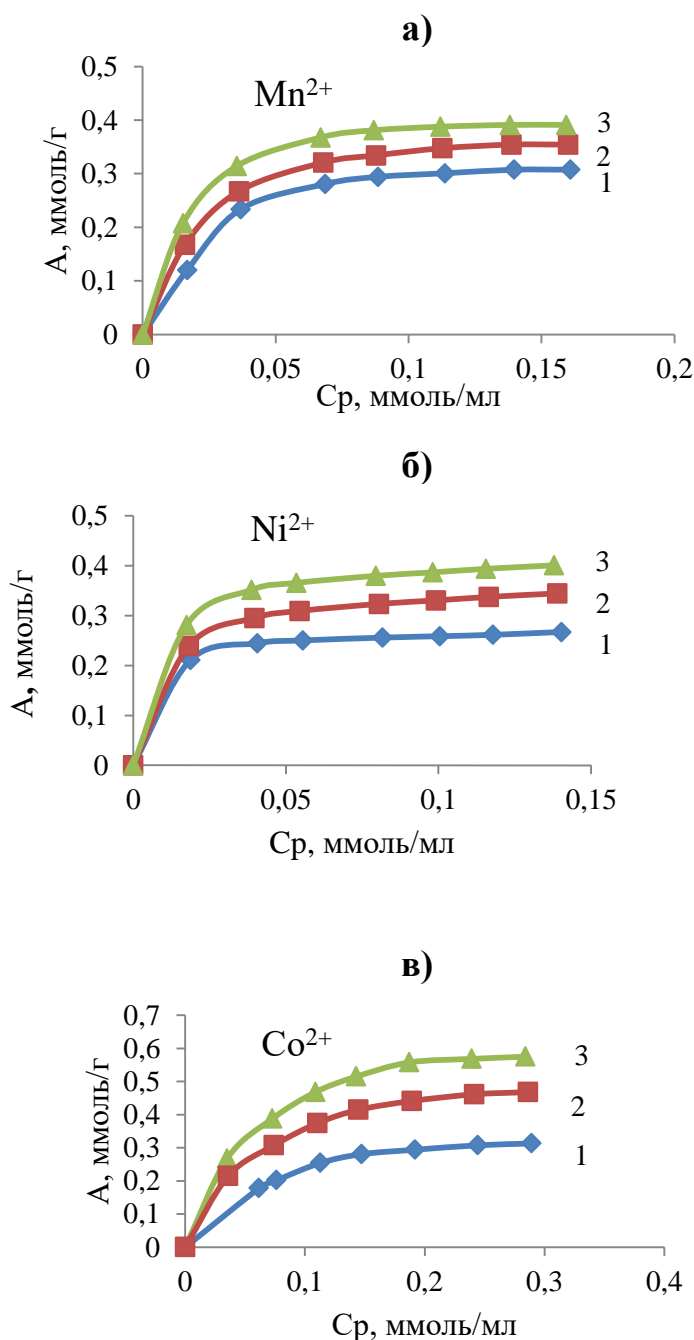
Полученные изотермы сорбции на исследуемых образцах каолинита катионов марганца, кобальта, никеля и цинка по классификации Гильса принадлежат к изотермам Ленгмюра [6, 7]. На рисунке 1 (а, б, в, г) приведены изотермы сорбции ионов Mn²⁺, Co²⁺, Ni²⁺, Zn²⁺ при температурах, К: 298, 318, 333. На изотерме адсорбции марганца, цинка и никеля присутствует участок

Генри, который подтверждает сильное взаимодействие сорбата с поверхностью сорбента. Дальнейшее увеличение концентрации ионов в процессе сорбции исследуемых катионов металлов приводит к достижению состояния насыщения адсорбента. Вид изотерм соответствует о мономолекулярной сорбции.

Увеличение емкости каолинита наблюдается в следующем ряду ионов металлов:



Полученные экспериментальные данные показывают, что при температуре 298 К сорбент имеет максимальную адсорбционную емкость в отношении ионов цинка. Данное явление объясняется наличием двух видов межмолекулярных взаимодействий: гидратации и взаимодействии иона цинка с сорбентом [6].



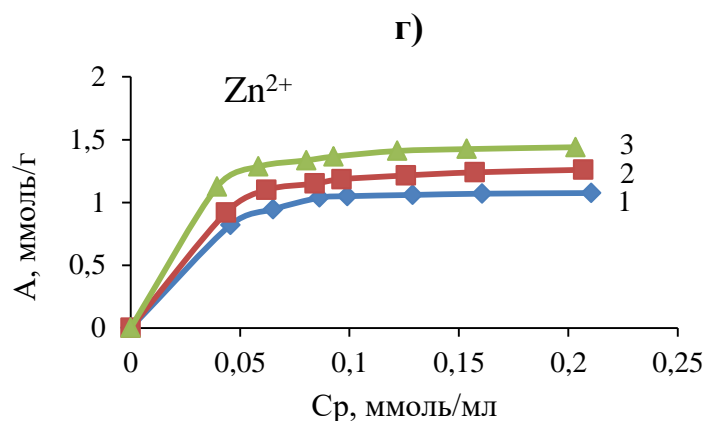
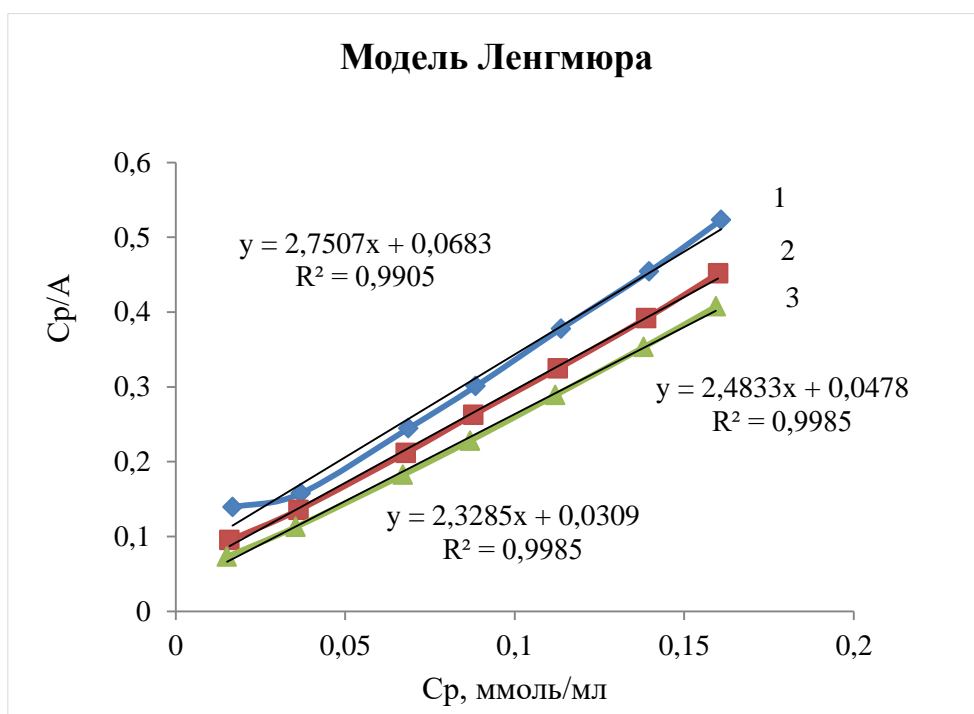


Рис. 1 (а, б, в, г). Изотермы сорбции ионов Mn^{2+} (а), Co^{2+} (б), Ni^{2+} (в), Zn^{2+} (г) на природном каолините при температурах: 298 К (1), 318 К (2), 333 К (3).

Fig. 1 (а, б, в, г). Sorption isotherms of Mn^{2+} (а), Co^{2+} (б), Ni^{2+} (в), Zn^{2+} (г) ions on natural kaolinite at temperatures, 298 К (1), 318 К (2), 333 К (3).

Экспериментальные изотермы сорбции исследованных ионов из водных растворов были обработаны в рамках классических четырех моделей адсорбции: Ленгмюра [7], Фрейндлиха [7], Дубинина-Радушкевича [8, 9, 10] и Темкина [11] (табл. 1).

На рисунке 2 представлены линейные формы изотерм четырех моделей для ионов марганца при сорбции на каолините.



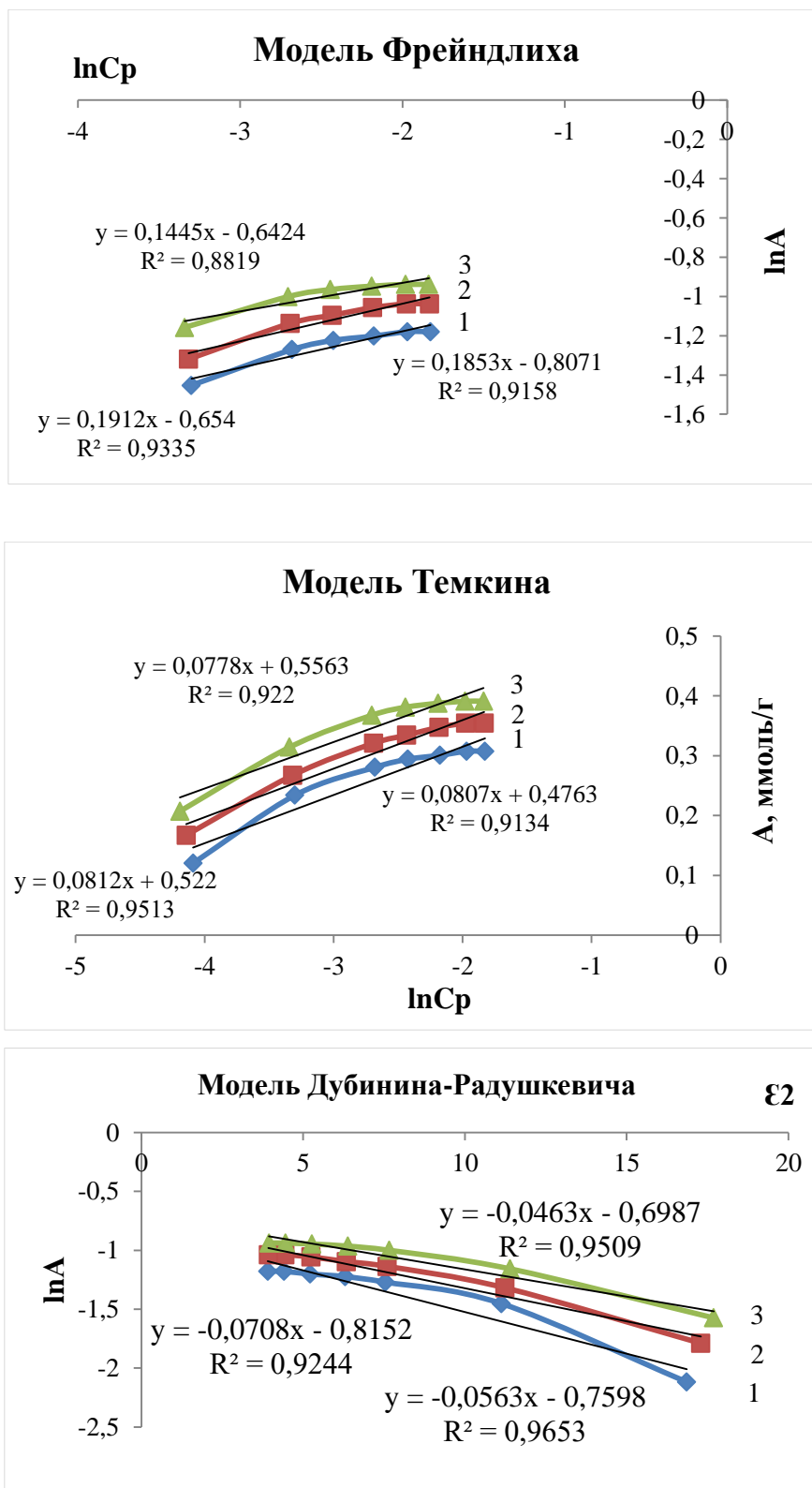


Рис. 2. Линеаризованные изотермы адсорбции Ленгмюра, Фрейндлиха, Темкина и Дубинина-Радушкевича ионов марганца на природной форме каолинита при температурах: 298 К (1); 318 К (2); 333 К (3).

Fig. 2. Linearized isotherms of Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin-Radushkevich of manganese ions in the natural form of kaolinite at temperatures: 298K (1); 318 K (2); 333 K (3).

В таблице 1 представлены уравнения для моделей Ленгмюра, Фрейндлиха, Темкина и Дубинина-Радушкевича.

Таблица 1. Модели изотерм сорбции
Table 1. Sorption isotherm models

Модель	Уравнение	Номер уравнения
Ленгмюра	$A = A_{\infty} \cdot \frac{K_L \cdot C_p}{1 + K_L \cdot C_p}$	(1)
	Линейная форма $\frac{C_p}{A} = \frac{C_p}{A_{\infty}} + \frac{1}{A_{\infty} \cdot K_L}$	(2)
Фрейндлиха	$A = K_L \cdot C_p^{1/n}$	(3)
	Линейное уравнение $\ln A = \frac{1}{n} \cdot C_p + \ln K_f$	(4)
Темкина	$A = \frac{1}{\alpha} \cdot \ln k_T + \frac{1}{\alpha} \ln C_p$	(5)
	Линейная форма $A = \frac{1}{\alpha} \cdot \ln(K_T \cdot C_p)$	(6)
Дубинина-Радушкевича	$A(T) = A_{\infty}(T) \cdot \exp\{-k \cdot E^2\}$	(7)
	Линейная форма $\ln A(T) = \ln A_{\infty} - k \cdot E^2$	(8)

Примечание: A – сорбционная емкость, ммоль/г; A_{∞} – предельная сорбционная емкость монослоя, ммоль/г; C_p – равновесная концентрация, ммоль/г; n , α , k – константы, найденные из опыта; ϵ – потенциал Поляни, кДж/моль, T – абсолютная температура, К.

Линейная изотерма позволяет графически определить постоянные параметры сорбционных изотерм. Рассчитанные значения постоянных уравнений приведены в таблице 2 и 3.

Анализ изотерм сорбции (рис. 1) и расчетных параметров модели Ленгмюра (табл. 2) показал, что предельная сорбционная емкость (A_{∞}) каолинита по отношению ко всем исследованным ионам возрастает с повышением температуры от 298 К до 333 К.

Из полученных данных по модели Ленгмюра необходимо отметить, чем больше константа сорбционного равновесия K_L , тем сильнее взаимодействие системы сорбент-сорбат [12]. По высоким значениям коэффициентов детерминации (0,999) сорбция всех исследованных ионов металлов хорошо описывается моделью Ленгмюра. Из этого следует, что сорбируемые ионы взаимодействуют с активными центрами сорбента, но ионы не взаимодействуют друг с другом. В связи с этим на поверхности сорбента образуется мономолекулярный сорбционный слой. Константы Фрейндлиха K_f и n позволяют сравнивать активности сорбированных ионов. Значения данных констант определяются через тангенс угла наклона прямой и точку ее пересечения с осью ординат. Значение параметра n характеризует интенсивность процесса сорбции и является показателем неоднородности сорбционных центров [13]. В модели Темкина в монослое линейно снижается теплота сорбции частиц по мере заполнения слоя.

РАВНОВЕСНЫЕ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АДСОРБЦИИ КАТИОНОВ

Таблица 2. Обработка изотерм сорбции ионов Mn^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} по моделям Ленгмюра, Фрейндлиха

Table 2. Processing of isotherms of sorption of Mn^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} ions according to Langmuir, Freundlich

Модель Ленгмюра												
Т, К	Mn^{2+}			Co^{2+}			Ni^{2+}			Zn^{2+}		
	A_{∞} , ммоль/г	K_L мл/г	R^2	A_{∞} , ммоль/г	K_L мл/г	R^2	A_{∞} , ммоль/г	K_L мл/г	R^2	A_{∞} , ммоль/г	K_L мл/г	R^2
298	0,364	40,44	0,999	0,392	14,9	0,999	0,28	100,9	0,999	1,16	78,27	0,996
318	0,403	52,83	0,999	0,572	16,92	0,999	0,37	172,6	0,999	1,38	60,5	0,998
333	0,43	77,6	0,999	0,695	18,57	0,997	0,43	290,5	0,999	1,54	81,38	0,999
Модель Фрейндлиха												
Т, К	Mn^{2+}			Co^{2+}			Ni^{2+}			Zn^{2+}		
	$\ln K_f$	n	R^2	$\ln K_f$	n	R^2	$\ln K_f$	n	R^2	$\ln K_f$	n	R^2
298	0,642	0,14	0,909	0,643	5,99	0,996	1,097	9,36	0,918	0,14	26,32	0,996
318	0,654	0,19	0,854	0,207	2,69	0,959	0,704	5,85	0,949	0,42	8,85	0,998
333	0,807	0,19	0,886	0,0003	2,63	0,949	0,568	6,21	0,923	0,53	10,75	0,999

Таблица 3. Обработка изотерм сорбции ионов Mn^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} по моделям Темкина и Дубинина-Радушкевича
Table 3. Processing of isotherms of sorption of Mn^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} ions according to Temkin and Dubinin-Radushkevich models

Модель Темкина												
Т, К	Mn^{2+}			Co^{2+}			Ni^{2+}			Zn^{2+}		
	$\ln K_T$	α	R^2	$\ln K_T$	α	R^2	$\ln K_T$	α	R^2	$\ln K_T$	α	R^2
298	5,95	12,50	0,913	4,90	11,24	0,996	12,76	40,0	0,934	8,71	6,37	0,780
318	6,44	12,35	0,951	5,07	7,87	0,984	9,12	20,4	0,969	8,06	4,98	0,889
333	7,22	12,99	0,922	5,17	6,79	0,976	9,50	18,5	0,947	9,69	5,46	0,892
Модель Дубинина-Радушкевича												
Т, К	Mn^{2+}			Co^{2+}			Ni^{2+}			Zn^{2+}		
	$\ln A_\infty$	k , ммоль/кДж	R^2	$\ln A_\infty$	k , ммоль/кДж	R^2	$\ln A_\infty$	k , ммоль/кДж	R^2	$\ln A_\infty$	k , ммоль/кДж	R^2
298	0,815	0,07	0,924	0,22	0,093	0,996	1,23	0,019	0,918	0,106	0,010	0,970
318	0,759	0,06	0,965	0,64	0,088	0,978	0,99	0,030	0,949	0,324	0,027	0,985
333	0,698	0,05	0,996	1,15	0,086	0,992	0,78	0,028	0,923	0,490	0,031	0,932

Для определения механизма сорбции использовали модель Дубинина-Радушкевича. Данная модель основана на теории Поляни. Изотермы сорбции, построенные в линейных координатах уравнения Дубинина-Радушкевича, позволяют определить константы уравнения A_{∞} и k . Обработка изотерм сорбции дает возможность определить природу адсорбционных сил.

Кроме этого модель Дубинина-Радушкевича используется для расчета свободной энергии адсорбции:

$$E = (-2k^{-0,5}). [14].$$

Полученные результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4. Свободная энергия адсорбции по параметрам модели Дубинина-Радушкевича
Table 4. Free energy of adsorption according to the parameters of the Dubinin-Radushkevich model

Ион сорбата	k, моль ² /кДж			E, кДж/ммоль			ΔG, кДж/ммоль		
	298 К	318 К	333 К	298 К	318 К	333 К	298 К	318 К	333 К
Mn ²⁺	0,07	0,056	0,046	2,70	2,99	3,30	-9,17	-9,84	-10,78
Co ²⁺	0,093	0,088	0,086	2,32	2,38	2,41	-7,01	-7,24	-8,85
Ni ²⁺	0,019	0,03	0,028	5,13	4,08	4,22	-11,42	-12,76	-13,90
Zn ²⁺	0,01	0,027	0,031	7,09	4,31	4,02	-10,16	-10,80	-10,90

Известно [15], что если значение свободной энергии (E) находится в интервале от 8 до 16 кДж/моль, то сорбционный процесс протекает по ионообменному механизму. При значении величины E меньше 8 кДж/моль процесс характеризуется как физическая сорбция. Результаты представленные в таблице 4 показывают, что все значения E для всех исследуемых ионов находятся в интервале от 2,32 до 7,09 кДж/моль, что свидетельствует о преобладании ван-дер-ваальсовых и электростатических взаимодействий в механизме сорбции.

Процесс сорбции ионов тяжелых металлов зависит от температуры. Изменение температуры способствует изменению термодинамических параметров ΔG^0 , ΔH^0 , ΔS^0 , которые объясняют механизм сорбционного процесса. Зная константу равновесия K_L можно рассчитать энергию Гиббса процесса сорбции по уравнению [16]:

$$\Delta G^0 = -RT \cdot \ln K_L$$

где R – универсальная газовая постоянная 8,314 Дж/(моль·К); T – температура, К; K_L - константа равновесия.

Термодинамические функции дают важную информацию о сорбционном процессе. Энергия Гиббса ΔG^0 определяет возможность протекания реакции. Если ΔG^0 имеет отрицательное значение, то процесс протекает самопроизвольно. Расчет термодинамических функций проводили с применением уравнения изотермы и изобары в интегральном виде. Изостерический метод расчета теплоты сорбции основан на применении уравнения Клаузиуса-Клапейрона [17]:

$$\frac{\Delta \ln C}{\Delta\left(\frac{1}{T}\right)} = -\frac{\Delta H}{R} \text{ при } A = \text{const}$$

где C – равновесная концентрация, ммоль/мл; T – температура, К; ΔH – изостерическая дифференциальная теплота сорбции, кДж/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/моль; A – сорбционная емкость, моль/г.

По рассчитанным значениям ΔG и ΔH определяли значения ΔS по уравнению:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S.$$

Рассчитанные термодинамические функции сорбционного процесса на основе экспериментальных данных представлены в таблице 5.

Таблица 5. Термодинамические функции сорбции исследуемых ионов металлов

Table 5. Thermodynamic functions of sorption of the studied metal ions

Постоянные Лэнгмюра, термодинамические функции	298 К	312 К	333 К
Mn²⁺			
A _∞ , ммоль/г	0,36	0,40	0,43
ΔG, кДж/моль	-9,17	-9,84	-10,78
ΔH, кДж/моль	2,08		
ΔS, Дж/моль·К	37,7	37,5	38,6
Co²⁺			
A _∞ , ммоль/г	0,39	0,57	0,70
ΔG, кДж/моль	-7,01	-7,24	-8,85
ΔH, кДж/моль	11,27		
ΔS, Дж/моль·К	67,48	57,47	55,55
Ni²⁺			
A _∞ , ммоль/г	0,28	0,37	0,43
ΔG, кДж/моль	-11,42	-12,76	-13,90
ΔH, кДж/моль	14,55		
ΔS, Дж/моль·К	8,86	16,18	19,22
Zn²⁺			
A _∞ , ммоль/г	1,16	1,38	1,54
ΔG, кДж/моль	-10,16	-10,80	-10,90
ΔH, кДж/моль	2,91		
ΔS, Дж/моль·К	40,01	41,09	41,47

Для изотерм сорбции энергетическая составляющая сорбции ΔH имеет положительные значения и отрицательные ΔG , уменьшающиеся с ростом температуры в интервале 298–333 К, означает, что процесс сорбции исследуемых металлов на каолините носит эндотермический характер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований сорбции ионов Mn^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} на природном каолините Кыштымского месторождения были изучены равновесные и термодинамические характеристики в интервале температур 298–333К. Установлено, что экспериментальные изотермы относятся к типу Ленгмюра. Математически подтверждено, что модель Ленгмюра лучше других описывает равновесные данные сорбции, что подтверждено коэффициентами детерминации (0,999).

Экспериментально установлен ряд значений предельной сорбционной емкости при температуре 298 К:

$$Ni^{2+} 0,27 < Co^{2+} 0,28 < Mn^{2+} 0,31 < Zn^{2+} 1,25 \text{ ммоль/г.}$$

Высокая сорбционная способность по отношению к ионам цинка обусловлена сочетанием электростатического притяжения и взаимодействия данного иона с поверхностью сорбента.

Определены термодинамические функции характеризующие сорбцию как самопроизвольный, эндотермический процесс, сопровождающийся увеличением энтропии на границе раздела фаз сорбент-раствор, что согласуется с механизмом вытеснения гидратированных ионов с поверхности и их закрепления на активных центрах каолинита.

Полученные данные позволяют рекомендовать каолинит Кыштымского месторождения в качестве эффективного, доступного, экологически безопасного сорбента для очистки водных объектов с высоким содержанием иона цинка и других исследуемых ионов на промышленных предприятиях.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS:

The authors declare no conflict of interests.

Список литературы:

1. Зайцев В. А. (2013). *Промышленная экология: учеб. пособие* М.:БИНОМ.
2. Алыков Н. М., Павлова А.В., Нгуэн Кхань Зуй (2010). Сорбционное удаление из воды ионов тяжелых металлов. *Безопасность жизнедеятельности*. (4), 17–20.
3. Левкин Н. Д., Комиссаров М. С., Мухина Н. Е. (2012). Сорбционная очистка сточных вод гальванического производства. *Безопасность жизнедеятельности*. (12), 45–48.
4. Гармаш А. В., Сорокина Н. М. (2017). *Метрологические основы аналитической химии*. Москва.
5. Шварценбах Г., Флашка Г. (1970). *Комплексонометрическое титрование*. М.: Химия.
6. Парфит Г., Рочестера Г.(1986). *Адсорбция из растворов на поверхности твердых тел*. М.: Мир.
7. Волкова В. А. (2015). *Теоретические основы охраны окружающей среды*. СПб.: Лань.
8. Толмачев А. М. (2012). *Адсорбция газов, паров и растворов*. М.: Граница.
9. Дубинин М. М. (1982). Поверхность и пористость адсорбентов. *Успехи химии*. 7, 1065–1074.

10. Радужкевич Л. В. (1970). *Основные проблемы физической адсорбции*. М.: Наука.
11. Шумилова М. А. (2024). Применение моделей адсорбции при исследовании поглощения ионов никеля почвой. *Теоретическая и прикладная экология*. (3), 45–53. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2024-3-045-053>.
12. Салтыкова С. Н., Карапетян К. Г., Коршунов А. Д., Назаренко М. Ю., Дорош И. В. (2024.) Сорбция ионов никеля зольными остатками горючих сланцев Ленинградского месторождения. *Сорбционные и хроматографические процессы*. 24(6), 1003–1014. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12587>.
13. Соколова Т. А., Трофимов С. Я. (2009). *Сорбционные свойства почв. Адсорбция*. Тула: Гриф и К.
14. Никифорова Т. Е., Козлов В. А., Родионова М. В., Модина Е. А. (2009). Сорбция ионов цинка продуктами, содержащими целлюлозную и белковую составляющие. *Изв. Вузов. Химия и химическая технология*. 52(3), 27–31.
15. Цивадзе А. Ю., Русанов А. И., Фомкин А. А. (2011). *Физическая химия адсорбционных явлений*. М.: Граница. 304.
16. Фролов Ю. Г. (1982). *Поверхностные явления и дисперсные системы*. М.: Химия.
17. Карнаухов А. П. (1999). *Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов*. Новосибирск: Наука. 469.

References:

1. Zaitsev V. A. (2013). *Industrial ecology: textbook*. М.: BINOM.
2. Alykov N. M., Pavlova A. V., & Nguyen Khanh Zuy (2010). Sorption removal of heavy metal ions from water. *Life Safety*. (4), 17–20.
3. Levkin N. D., Komissarov M. S., & Mukhina N. E. (2012). Sorption treatment of wastewater from galvanic production. *Life Safety*. (12), 45–48.
4. Garmash A. V., & Sorokina N. M. (2017). *Metrological foundations of analytical chemistry*. Moscow.
5. Schwarzenbach G., & Flaschka G. (1970). *Complexometric titration*. Moscow: Chemistry.
6. Parfit G., & Rochester G. (1986). *Adsorption from solutions on the surface of solids*. Moscow: Mir.
7. Volkova V. A. (2015). *Theoretical foundations of environmental protection*. St. Petersburg: Lan.
8. Tolmachev A. M. (2012). *Adsorption of gases, vapors and solutions*. Moscow: Granitsa.
9. Dubinin M. M. (1982). Surface and porosity of adsorbents. *Advances in Chemistry*. 7, 1065–1074.
10. Radushkevich L. V. (1970). *Basic problems of physical adsorption*. Moscow: Nauka.
11. Shumilova M. A. (2024). Application of adsorption models in the study of nickel ion absorption by soil. *Theoretical and Applied Ecology*. (3), 45–53. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2024-3-045-053>.
12. Saltykova S. N., Karapetyan K. G., Korshunov A. D., Nazarenko M. Yu., & Dorosh I. V. (2024.) Sorption of nickel ions by ash residues of oil shale of the Leningrad deposit. *Sorption and chromatographic processes*. 24(6), 1003–1014. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12587>.
13. Sokolova T. A., & Trofimov S. Ya. (2009). Sorption properties of soils. *Adsorption*. Tula: Grif i K.

14. Nikifirova T. Ye., Kozlov V. A., Rodionova M. V., & Modina Ye. A. (2009). Sorption of zinc ions by products containing cellulose and protein components. *Izv. Vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 52(3), 27–31.
15. Tsivadze A. Yu., Rusanov A. I., & Fomkin A. A. (2011). *Physical chemistry of adsorption phenomena*. M.: Border. 304.
16. Frolov Yu. G. (1982). *Surface phenomena and disperse systems*. Moscow: Chemistry.
17. Karnaukhov A. P. (1999). *Adsorption. Texture of dispersed and porous materials*. Novosibirsk: Science. 469.