

УДК 549

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2026-65-1-91-96

АДСОРБЦИЯ КАДМИЯ НА ТАЛЬКЕ (КИНЕТИКА И РАВНОВЕСИЕ)

Ольга Николаевна Карасева¹✉, Дмитрий Александрович Ханин²,
Леонид Зиновьевич Лакштанов³

¹ Институт экспериментальной минералогии имени академика Д.С. Коржинского, Черноголовка, Россия; olga@iem.ac.ru ✉

² Институт экспериментальной минералогии имени академика Д.С. Коржинского, Черноголовка, Россия;
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; mamontenok49@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-0463-0731>

³ Институт экспериментальной минералогии имени академика Д.С. Коржинского, Черноголовка, Россия;
leonid@iem.ac.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2878-0884>

Аннотация. Исследована адсорбция ионов кадмия на поверхности природного талька. Получены зависимости величины адсорбции от pH раствора при 25 °С. Показано, что максимальное поглощение кадмия из раствора происходит при pH 7–8. Адсорбция наиболее интенсивно протекает в первые 5 мин, адсорбционное равновесие устанавливается примерно через 40 мин после контакта минерал/раствор. Установлен вклад в общую скорость процесса стадии химического взаимодействия ионов кадмия с поверхностью талька, что подтверждается соответствием экспериментальных данных и кинетической моделью псевдо-второго порядка. Изотермы адсорбции наиболее адекватно описываются моделью Фрейндлиха, что указывает на неоднородность поверхностных адсорбционных центров, обладающих различной энергией. Эффективное поглощение тальком ионов кадмия обуславливает возможность использования талька в качестве сорбента для очистки природных и промышленных сточных вод в широком диапазоне pH.

Ключевые слова: адсорбция, кадмий, тальк, кинетика, изотермы адсорбции

Для цитирования: Карасева О.Н., Ханин Д.А., Лакштанов Л.З. Адсорбция кадмия на тальке (Кинетика и равновесие) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2026. № 1. С. 91–96.

CADMIUM ADSORPTION ON TALC (KINETICS AND EQUILIBRIUM)

Olga N. Karaseva¹✉, Dmitriy A. Khanin², Leonid Z. Lakshtanov³

¹ D.S. Korzhinskii Institute of Experimental Mineralogy, Chernogolovka, Russia; olga@iem.ac.ru ✉

² D.S. Korzhinskii Institute of Experimental Mineralogy, Chernogolovka, Russia; Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; mamontenok49@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0463-0731>

³ D.S. Korzhinskii Institute of Experimental Mineralogy, Chernogolovka, Russia; leonid@iem.ac.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-2878-0884>

Abstract. The adsorption of cadmium ions on the surface of natural talc was studied. The dependences of the adsorption value on the pH of the solution at 25 °C were obtained. It was shown that the maximum absorption of cadmium from the solution occurs at pH 7–8. Adsorption is most intense in the first 5 min, the adsorption equilibrium is established approximately 40 min after the mineral/solution contact. The contribution of the stage of chemical interaction of cadmium ions with the talc surface to the overall rate of the process was established, which is confirmed by the agreement between the experimental data and the pseudo-second-order kinetic model. Adsorption isotherms are most adequately described by the Freundlich model, which indicates the heterogeneity of the surface adsorption centers with different energies. The effective sorption of cadmium ions by talc makes it possible to use talc as a sorbent for the purification of natural and industrial wastewater in a wide pH range.

Keywords: adsorption, cadmium, talc, kinetics, adsorption isotherms

For citation: Karaseva O.N., Khanin D.A., Lakshtanov L.Z. Adsorption of cadmium on talc (kinetics and equilibrium). *Moscow University Geol. Bull.* 2026; 1: 91–96. (In Russ.).

Введение. Загрязнение воды — серьезнейшая экологическая проблема современности, угрожающая здоровью живых организмов. Одними из наиболее токсичных загрязнителей являются ионы тяжелых металлов, которые накапливаются в почвах, отложениях, поверхностных и грунтовых водах, тем самым вызывая серьезный экологический кризис. Кадмий Cd (II) является одним из наиболее токсичных тяжелых металлов, который может накапливаться в организме человека и вызывать за-

болевания почек, костей и легких [Mehta et al., 2015; Mehta et al., 2016; Paesano et al., 2020; Sun et al., 2020].

Кадмий в условиях окружающей среды обычно присутствует в виде Cd^{2+} , и адсорбция Cd(II) на экологически значимых субстратах может снизить его концентрацию и подвижность в водных системах.

Основными кадмий-содержащими минералами, помимо собственно кадмия являются, такие широко распространенные минералы, как галенит, пирит и сфалерит. Обычно они встречаются в подавляю-

щей массе отрабатываемых золоторудных месторождений, где ассоциируют с тальк-карбонатными метасоматитами (Сухоложское, Вернинское, Берёзовское и Кочкарское месторождения). Рудная часть на этих месторождениях подвергается глубокому переделу с целью извлечения золота и других благородных металлов. В ходе процесса извлечения расходуется большое количество воды, которая сливается в шламоотстойники, часто естественным путем, тем самым контактируя с ювенильными водами и разгружая в них различные химические элементы в том числе и кадмий. При обогащении рудной составляющей тальк вместе с другими нерудными минералами накапливается в большом количестве в хвостохранилищах и остается там без использования долгие десятилетия, хотя мог бы использоваться в качестве эффективного барьера по ограничению подвижности кадмия. Тальк, как глинистый минерал, за счет своей слоистой структуры обладает достаточно высокой адсорбционной способностью и может быть потенциальным аккумулятором кадмия.

Эффективные методы удаления кадмия, такие как адсорбция на глинистых минералах, активно изучаются благодаря низкой стоимости и доступности материалов. Глинистые минералы повсеместно распространены в геосфере и считаются доминирующими поглотителями Cd(II) в водных средах [Oakley et al., 1981]. Адсорбция кадмия была детально исследована на многих минералах (серпентин, каолинит, палыгорскит и др. [Hamidpour et al., 2019; Cao et al., 2017; Wang et al., 2016; Ruyter-Hooley et al., 2017; Hizal et al., 2006; Fu et al., 2012]), кроме талька, которому посвящено только одно исследование [Huang, Fuerstenau, 2001], где изучено влияние адсорбции кадмия на электроповерхностные свойства и устойчивость суспензии талька. Кроме того, данные по адсорбции кадмия [Huang, Fuerstenau, 2001] выше pH 8,7, по видимому, относятся к осаждению Cd(OH)_2 .

Таким образом, учитывая близость нахождения потенциальных источников кадмия и талька, приуроченных к золоторудным месторождениям, мы предприняли попытку всестороннего изучения адсорбции кадмия на тальке с дальнейшими выводами об эффективности использования талька в качестве барьера для миграции кадмия в природных водах. Для понимания механизмов адсорбции кадмия на тальке были исследованы кинетика и равновесие адсорбции в широком диапазоне pH и концентрации кадмия.

Объекты и методы исследования. В качестве адсорбента использовался природный тальк Шабровского месторождения Среднего Урала. Минеральный состав был подтвержден с помощью рентгенофазового анализа на дифрактометре D2 Phaser (Bruker). По результатам микронзондового анализа усредненная формула талька имеет вид $(\text{Mg}_{2.85}\text{Al}_{0.04}\text{Fe}_{0.01})_{2.90}\text{Si}_{4.02}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$. В тальке отмечается незначительная примесь Al_2O_3 до 1,7 мас.%, FeO до 0,5 мас.%, содержания Ca, V, Cr, Mn, Ni, Co,

Zn ниже предела обнаружения, который больше 0,2 мас.% на элемент.

Подготовка порошка талька с размером частиц 30–100 мкм подробно описана в работе Карасевой с соавторами [2024]. Величины удельной поверхности талька были измерены низкотемпературным методом БЭТ по адсорбции азота с использованием сорбционного анализатора QUADRASORB SI (Федеральный исследовательский центр проблем физической химии и медицинской химии РАН) и составили 6,1 м²/г.

При проведении экспериментов использовались 0,01 М растворы HCl и NaOH. Раствор HCl готовили из стандарт-титра *соляной кислоты* 0,1 н (осч), а раствор NaOH — путем растворения навески твердого NaOH (осч) и стандартизации раствора по известной концентрации HCl. Исходный раствор Cd^{2+} (0,1 М) был приготовлен из реактива $\text{Cd(NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (ООО «Баум-Люкс»). Растворы с меньшими концентрациями металла готовили разбавлением исходного с приведением к ионной силе 0,01 М.

Исследования зависимости адсорбции Cd^{2+} на тальке от pH раствора проводили методом потенциометрических титрований при 25 °С. Для этого в герметичную термостатируемую ячейку, в отверстия крышки которой были вставлены комбинированный электрод и трубка для подачи аргона, помещали 100 мл 0,01 М NaCl, добавляли 2 мл 0,01 М HCl и навеску талька массой 0,2–1,0 г. При интенсивном перемешивании суспензии и после установления pH 3,9–4,1 добавляли аликвоту 1 мМ раствора, содержащего Cd^{2+} ($I=0,01$ М). Начальная концентрация кадмия в растворе составляли от 0,1 до 10 мкмоль/л. Через 40 минут отбирали аликвоту исследуемой суспензии и проводили титрование путем добавления 0,01 М NaOH с одновременным отбором проб с шагом 40 минут. Как будет показано ниже, в течение этого времени происходит установление адсорбционного равновесия. В ходе опыта применялась продувка ячейки аргоном для предотвращения попадания атмосферной углекислоты.

При изучении кинетики адсорбции ионов кадмия на поверхности талька в термостатируемую ячейку помещали 100 мл 0,01 М NaCl, добавляли 0,5 г талька, с помощью HCl или NaOH при постоянном перемешивании доводили раствор до нужного pH в диапазоне от 6 до 8,5 и вводили аликвоту раствора $\text{Cd(NO}_3)_2$. Исходная концентрация кадмия в растворе задавалась от 10^{-7} до 10^{-5} М. Пробы отбирали через определенные промежутки времени после начала контакта фаз: через 2, 20, 40 и 120 минут.

Концентрацию Cd в растворе после центрифугирования измеряли методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Относительная погрешность метода 5%.

Состав раствора и показатели насыщения рассчитывались с помощью программы PHREEQC [Parkhurst and Appelo, 1999].

Обработка данных. Для описания изотерм адсорбции и расчетов параметров адсорбционного

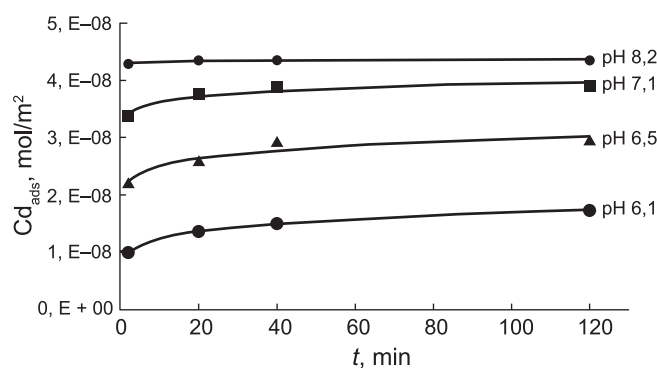


Рис. 1. Кинетика адсорбции кадмия на тальке при разных pH раствора. Исходные концентрации ионов кадмия 0,97–1,33 $\mu\text{mol/L}$, $T=25^\circ\text{C}$

равновесия были использованы модели Ленгмюра и Фрейндлиха. Модель Ленгмюра предполагает, что на поверхности сорбента образуется мономолекулярный слой адсорбата, а все активные центры обладают равной энергией [Douven et al., 2015; Paez et al., 2011]. Уравнение Ленгмюра имеет следующий вид:

$$q = \frac{K_L Q_{\max} c}{1 + K_L c}, \quad (1)$$

где q — величина адсорбции, $Q_{\max}$ — величина предельной адсорбции, K_L — константа адсорбционного равновесия, c — равновесная концентрация ионов.

Модель Фрейндлиха применяется для описания адсорбции на гетерогенной поверхности, адсорбционные центры которой обладают различными величинами энергии, поэтому в первую очередь происходит заполнение активных центров с максимальной энергией [Douven et al., 2015; Paez et al., 2011]. Уравнение Фрейндлиха можно представить в виде:

$$q = K_F c^{1/n}, \quad (2)$$

где q — величина адсорбции, K_F — константа Фрейндлиха, характеризующая адсорбционную емкость, $1/n$ — интенсивность адсорбции, которая определяет энергию и неоднородность адсорбционных центров.

Для описания кинетических закономерностей адсорбции было использовано уравнение псевдо-второго порядка Хо и Маккея [Ho, McKay, 1999], которое может быть представлено в интегрированной форме следующим образом:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k q_e^2} + \frac{t}{q_e}, \quad (3)$$

где k — это константа скорости, г/мг мин, где q_e и q_t — количество металла, сорбированное при равновесии и за определенный промежуток времени t (мин), мг/г.

Результаты экспериментов и их обсуждение. На рис. 1 представлены кинетические кривые адсорбции ионов кадмия на тальке в виде зависимости количества поглощенного кадмия (Cd_{ads} , mol/m^2) от

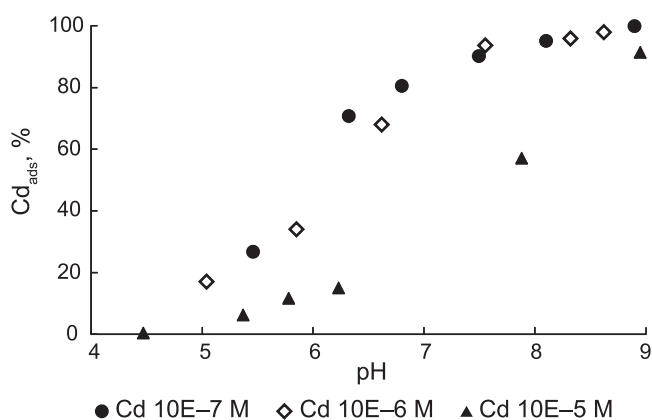


Рис. 2. Зависимость адсорбции кадмия на тальке от pH при 25°C . Концентрация суспензии 5 г/л

времени (t , мин) в интервале pH 6–8. Адсорбция Cd^{2+} с высокой скоростью протекает в первые 1–5 минут, равновесие достигается примерно через 40–60 минут после начала контакта минерал/раствор. В связи с этим, при проведении кислотно-основных титрований поверхности талька отбор пробы и введение новой порции раствора щелочи производили через каждые 40 минут.

Анализ экспериментальных данных, полученных в ходе потенциометрических титрований показал, что адсорбция ионов кадмия (Cd , %) увеличивается с ростом pH раствора, что типично для адсорбции катионов (рис. 2).

Из литературных данных известно [Burdukova et al., 2007], что pH точки нулевого заряда поверхности талька приблизительно равен 7,7. Таким образом, адсорбция катионов Cd происходит преимущественно в области ниже $\text{pH}_{\text{тнз}}$, где преобладают положительно заряженные поверхностные группы, участвующие в адсорбционном взаимодействии. Очевидно, что в данном случае вклад электростатических сил в процесс адсорбции минимален, поэтому можно предположить, что поглощение ионов кадмия происходит за счет его хемосорбции на поверхности с образованием прочных ковалентных связей.

Для описания вклада химического взаимодействия в общую скорость процесса, была применена модель реакций псевдо-второго порядка [Ho, McKay, 1999], которая позволяет учитывать взаимодействия сорбат–сорбент, а также межмолекулярные взаимодействия адсорбированных частиц. Если модель кинетики скорости псевдо-второго порядка (уравнение 3) применима для сорбционного процесса, то построение в координатах « t/q_t — t » должно иметь линейную зависимость, из которой по тангенсу угла наклона и свободному члену уравнения (3) можно вычислить q_e и k [Хамизов, 2020]. Как видно на рис. 3, полученные зависимости являются прямолинейными при всех pH и во всем диапазоне времени процесса адсорбции.

На основании полученных графических зависимостей (рис. 3) были рассчитаны константы

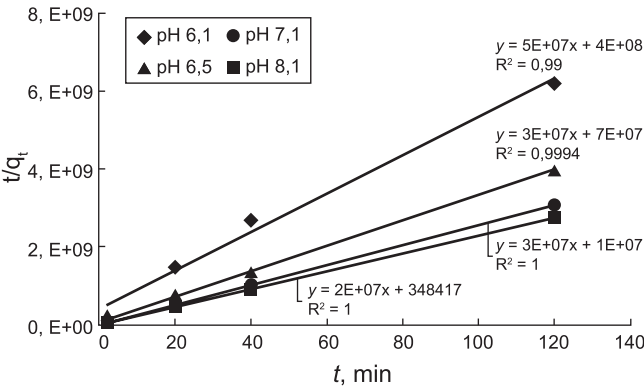


Рис. 3. Кинетика адсорбции ионов Cd^{2+} в координатах уравнения псевдо-второго порядка. $T = 25^\circ\text{C}$

скорости процесса k и значения равновесной адсорбции q_e . Экспериментальные данные по кинетике адсорбции Cd^{2+} на природном тальке и результаты расчетов представлены в табл. 1. Нужно отметить, что расчетные значения q_e дают хорошие совпадения с экспериментальными данными.

Таблица 1

Кинетические параметры процесса адсорбции ионов кадмия					
pH	Исходная концентрация Cd , $\times 10^{-8}$, моль/м ²	Равновесная величина адсорбции $q_e \times 10^{-8}$, моль/м ²		k , м ² /моль·мин	R^2
		эксперимент	расчет		
6,1	3,20	1,94	2,0	$6,3 \cdot 10^6$	0,99
6,5	3,73	3,01	3,33	$1,3 \cdot 10^7$	0,99
7,1	4,26	3,90	3,33	$9,0 \cdot 10^7$	1,0
7,5	4,00	3,84	3,33	$2,3 \cdot 10^8$	1,0
8,1	4,36	4,35	5,00	$1,1 \cdot 10^9$	1,0

Таким образом, высокие значения коэффициентов корреляции ($R^2 \geq 0,99$; табл. 1) и линейная зависимость (рис. 3) позволяют судить в пользу применимости модели псевдо-второго порядка для описания химической стадии процесса адсорбции, а также для возможности учета межмолекулярных взаимодействий в системе « Cd^{2+} — тальк».

Как показано на рис. 2, максимальная адсорбция кадмия на тальке при заданных исходных концентрациях ионов металла происходит при pH 7–8. Экспериментальные данные, полученные в ходе кислотно-основных титрований суспензии талька, относящиеся к данному интервалу pH, были использованы для описания изотерм адсорбции и расчетов параметров адсорбционного равновесия с применением уравнений Ленгмюра и Фрейндлиха. Процесс адсорбции кадмия на тальке не описывается моделью Ленгмюра, о чем свидетельствуют низкие значения коэффициентов корреляции R^2 (0,6–0,8).

На рис. 4 представлены изотермы адсорбции ионов кадмия из водных растворов с исходной

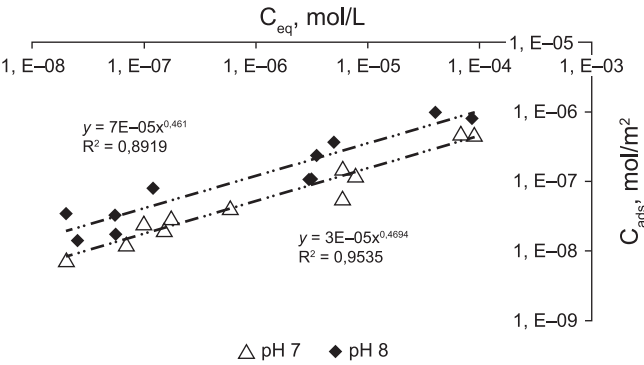


Рис. 4. Изотермы адсорбции ионов кадмия на природном тальке по модели Фрейндлиха при 25 °C

концентрацией от 0,1 до 10 мкмоль/л при pH 7–8 на природном тальке в логарифмических координатах уравнения Фрейндлиха, в котором величина C_{ads} (mol/m²) была рассчитана следующим образом:

$$C_{ads} = \frac{C_0 - C_{eq}}{S \cdot l}, \quad (4)$$

где C_{ads} — равновесная концентрация ионов кадмия в твердой фазе, mol/m², C_0 — исходная концентрация кадмия в растворе, mol/L, C_{eq} — равновесная концентрация кадмия в растворе, mol/L, S — удельная поверхность талька, м²/г, l — концентрация суспензии талькового порошка, г/L.

Значения коэффициентов корреляции R^2 (0,89 и 0,95) свидетельствуют об адекватном описании экспериментальных данных изотермой Фрейндлиха, предполагающей, что поверхность природного талька содержит активные центры с различной энергией сродства к ионам кадмия. Кадмий, вероятно, адсорбируется на плоскости Mg-OH, образуя прочные ковалентные связи, в то время как адсорбция на Si-O центрах связана только с электростатическим притяжением с образованием слабых внешнесферных комплексов [Pivovarov, 2008; Wang et al., 2023].

Константы уравнения Фрейндлиха K_F и n , представленные в табл. 2, были рассчитаны из наклона и пересечения прямой с осью ординат.

Таблица 2

Значения констант в уравнениях изотермы Фрейндлиха для адсорбции ионов кадмия на тальке при 25 °C

pH	K_F , mol/m ² · 10 ⁵	$1/n$	Коэффициент корреляции, R^2
7	3,43	0,469	0,954
8	6,78	0,461	0,892

Величина K_F существенно зависит от pH раствора, в то время как параметр $1/n$, указывающий на интенсивность адсорбционного процесса и распределение активных центров, остается практически неизменным. Значение $1/n$ приблизительно равно 0,5, что свидетельствует о высоком сродстве по-

верхности талька к ионам кадмия. При увеличении pH раствора на 1, величина K_F возрастает примерно в два раза, что, согласуется с увеличением адсорбции кадмия при увеличении pH (рис. 2).

Коэффициент K_F в уравнении изотермы Фрейндлиха является по сути аналогом обычного коэффициента распределения ($K_d = C_{ads}/C$), зависящего от pH. Наблюдаемая высокая корреляция значений K_d с pH раствора подразумевает простую связь между относительной подвижностью этих металлов и pH водоносного слоя.

Значения K_d можно упрощенно связать с относительной скоростью миграции (скоростью кадмия, V_{Cd} , относительно скорости потока воды в порах, V_w) по формуле (Freeze, Cherry, 1979):

$$\frac{V_{Cd}}{V_w} = \left(1 + \frac{\rho}{\varepsilon K_d} \right)^{-1}, \quad (5)$$

где ρ — плотность материала водоносного горизонта, ε — пористость.

На рис. 5 показано, что подвижность кадмия экспоненциально уменьшается с ростом pH и очень ограничена в водоносных горизонтах с высоким содержанием талька. Даже при pH 5 относительная скорость кадмия составляет около 1%, а при более высоких значениях pH гораздо меньше. Относительная скорость миграции уменьшается примерно в 6–7 раз при увеличении pH на единицу.

Заключение. Адсорбция кадмия на тальке показывает типичное поведение для адсорбции катионов: быстрое увеличение процента адсорбции, от незначительной до почти полной, в достаточно узком интервале pH 5–7. При увеличении концентрации кадмия интервал pH адсорбции существенно увеличивается.

Результаты исследования показывают, что адсорбционное равновесие описывается изотермой Фрейндлиха, предполагающей, что на поверхности талька содержатся активные центры с различной энергией сродства к ионам кадмия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Карасева О., Лакишанов Л., Ханин Д. и др. Влияние pH, CO_2 и органических лигандов на кинетику растворения талька и лизардита // Геохимия. 2024. Т. 69, № 4. С. 393–403.

Карасева О., Лакишанов Л., Ханин Д. и др. Кинетика растворения талька в присутствии органических комплексообразователей // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 3. С. 59–64.

Хамизов Р. О кинетическом уравнении псевдо-второго порядка в сорбционных процессах // Журнал физической химии. 2020. Т. 94, № 1. С. 125–130.

Burduková E., Becker M., Bradshaw D., et al. Presence of negative charge on the basal planes of New York talc // Journal of Colloid and Interface Science. 2007. V. 315. P. 337–342.

Cao C., Liang C., Yin Y., et al. Thermal activation of serpentine for adsorption of cadmium // Journal of Hazardous Materials. 2017. Vol. 329. P. 222–229.

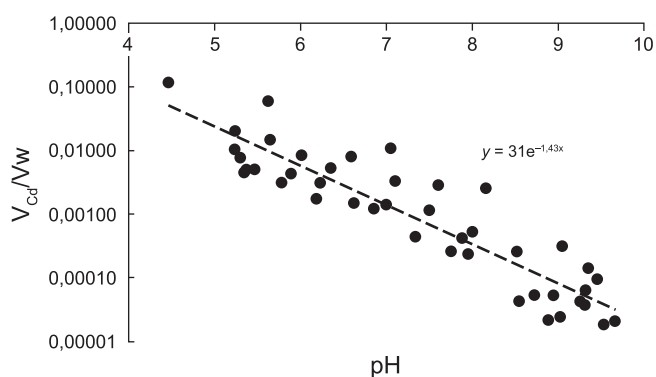


Рис. 5. Относительная скорость миграции кадмия, как функция pH. Символы • — рассчитанные по уравнению (4) ($\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$, $\varepsilon = 0,3$) значения относительной подвижности кадмия из экспериментально полученных значений K_d для всех концентраций кадмия и концентраций суспензии. Пунктирная прямая — линейная аппроксимация

Адсорбционное равновесие устанавливается в течение 40 минут. Адсорбция ионов кадмия на тальке подчиняется кинетической модели псевдо-второго порядка, и лимитирующей стадией адсорбционного процесса является химическое взаимодействие между ионами кадмия и функциональными группами на поверхности талька с образованием прочных ковалентных связей.

При $pH > 5$ подвижность кадмия в водоносных горизонтах с высоким содержанием талька сильно ограничена. Эффективное поглощение тальком ионов кадмия обуславливает возможность использования талька в качестве сорбента для очистки природных и промышленных сточных вод в широком диапазоне pH.

Финансирование. Исследования выполнены за счет средств Российского научного фонда, проект № 22-27-00035. Аналитические работы выполнены в рамках госбюджетной темы «Экспериментальное и теоретическое моделирование растворимости и форм переноса компонентов во флюидно-магматических и гидротермальных системах (№ FMUF-2022-0003).

Douven S., Paez C., Gommès C. The range of validity of sorption kinetic models // Journal of Colloid and Interface Science 2015. Vol. 448. P. 437–450.

Freeze R.A., Cherry J.A. Groundwater // Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs. 1979. Vol. 7632. P. 604.

Fu C., Zhu X., Dong X., Zhao P., et al. Study of adsorption property and mechanism of lead(II) and cadmium(II) onto sulfhydryl modified attapulgite // Arabian Journal of Chemistry. 2012. Vol. 14. P. 1–10.

Hamidpour M., Karamooz M., Akhgar A., et al. Adsorption of Cadmium and Zinc onto Micaceous Minerals: Effect of Siderophore Desferrioxamine // Pedosphere. 2019. Vol. 29. P. 590–597.

Hizal J., Apak R. Modeling of cadmium (II) adsorption on kaolinite-based clays in the absence and presence of humic acid // Applied Clay Science. 2006. Vol. 32. P. 232–244.

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

Huang P., Fuerstenau D. The effect of the adsorption of lead and cadmium ions on the interfacial behavior of quartz and talc // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. 2001. Vol. 177. P.147–156.

Mehta V., Basu H., Singhal R., et al. Simple and sensitive colorimetric sensing of Cd^{2+} ion using chitosan dithiocarbamate functionalized gold nanoparticles as a probe // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2015. Vol. 220. P. 850–858.

Mehta J., Bhardwaj S., Bhardwaj N., et el. Progress in the biosensing techniques for trace-level heavy metals // *Biotechnology Advances*. 2016. Vol. 34. P. 47–60.

Oakley A. Interviewing women: A contradiction in terms? // *Doing Feminist Research* / Ed. H. Roberts. London: Routledge and Kegan Paul, 1981. P. 30–61.

Paesano L., Marmioli M., Bianchi M., et el. Differences in toxicity, mitochondrial function and miRNome in human cells exposed in vitro to Cd as CdS quantum dots or ionic Cd // *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 393. P. 1–15.

Paez C., Lambert S., Poelman D., et al. Improvement in the methylene blue adsorption capacity and photocatalytic activity of H_2 -reduced rutile- TiO_2 caused by Ni(II)porphyrin preadsorption // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2011. Vol. 106. P. 220–227.

Parkhurst D., Appelo C. User's Guide to PHREEQC (Version 2) — A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations // U.S. Geological Survey, Water Resources Investigations Report. 99–4259; Washington DC. 1999. P. 327.

Pivovarov S. Adsorption of ions onto amorphous silica: Ion exchange model // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2008. Vol. 319. P. 374–376.

Ruyter-Hooley M., Johnson B., Morton D., et al. The adsorption of myo-inositol hexaphosphate onto kaolinite and its effect on cadmium retention // *Applied Clay Science*. 2017. Vol. 135. P. 405–413.

Sun Y., Ye H., Wei Z., et al. Root cell walls and phytochelatins in low-cadmium cultivar of *Brassica parachinensis* // *Pedosphere*. 2020. Vol. 30. P. 426–432.

Wang X., Huang Y., Zhong Z., et al. Theoretical investigation of cadmium vapor adsorption on kaolinite surfaces with DFT calculations // *Fuel*. 2016. Vol. 166. P. 333–339.

Wang Z., Tian H., Liu J., et al. Cd(II) adsorption on earth-abundant serpentine in aqueous environment: Role of interfacial ion specificity // *Environmental Pollution*. 2023. Vol. 331. 121845.

Статья поступила в редакцию 31.10.2025,
одобрена после рецензирования 12.11.2025,
принята к публикации 27.02.2026