

## Изучение сорбции ионов кобальта из воды раковинной моллюска *Lissachatina fulica*

© 2026. Н. А. Воронин, преподаватель, В. А. Сомин, д. т. н., зав. кафедрой, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 656038, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, д. 46, e-mail: voroninna00@gmail.com

Соединения кобальта являются одними из наиболее токсичных загрязнений водных объектов, которые могут попадать в них вследствие сбросов недостаточно очищенных сточных вод предприятий машиностроения и химической промышленности. В природной среде кобальт накапливается в тканях растений и животных и по трофической цепи может попасть в организм человека, вызывая токсическое и мутагенное воздействие. В связи с этим важным является использование технологий, позволяющих эффективно извлекать кобальт из воды различными материалами. В данной работе представлены результаты исследований по изучению сорбции кобальта из воды раковинной моллюска *Lissachatina fulica* (Férussac, 1821). Для исследований использовали предварительно отмытые и измельченные на щёковой дробилке раковины с размерами частиц от 2 до 5 мм, как в нативном виде, так и модифицированные раствором гидроксида натрия с концентрацией 10 % и обработанные ультразвуком частотой 40 кГц. Для всех материалов определена статическая сорбционная ёмкость, которая составила для нативного материала 37 мг/г, модифицированного гидроксидом натрия – 31 мг/г, модифицированного ультразвуком – 17 мг/г. Построены линеаризованные изотермы сорбции ионов кобальта по моделям Ленгмюра, Фрейндлиха, Дубинина-Радушкевича и Тёмкина. Рассчитаны константы сорбционного равновесия и величины предельной сорбции по указанным моделям. Выявлено, что сорбция ионов кобальта удовлетворительно описывается моделями Ленгмюра, Фрейндлиха и Тёмкина как для нативного материала, так и для модифицированного и имеет физический характер. Модель Дубинина-Радушкевича не подходит для описания сорбции исследуемых материалов (коэффициент корреляции составил менее 0,2). Проведение активации нативного материала гидроксидом натрия и ультразвуком нецелесообразно, поскольку приводит к снижению сорбционной ёмкости материала в 1,2 и 2,2 раза соответственно.

**Ключевые слова:** адсорбция, ионы кобальта, моллюски, загрязнение воды.

## Study of cobalt ions' sorption from water by *Lissachatina fulica* shell

© 2026. N. A. Voronin ORCID: 0009-0004-5887-8796, V. A. Somin ORCID: 0000-0003-3276-5174,  
Altai State Technical University named after I.I. Polzunov,  
46, Lenin Ave., Barnaul, Russia, 656038,  
e-mail: voroninna00@gmail.com

Cobalt compounds are among the most toxic pollutants of water bodies that can enter them due to discharges of insufficiently treated wastewater from engineering and chemical industries. In the environment cobalt accumulates in plant and animal tissues and can enter the human body through the trophic chain, causing toxic and mutagenic effects. In this regard, it is important to use technologies that effectively extract cobalt from water using various materials. This paper presents the results of studies on the cobalt sorption from water by the shell of the *Lissachatina fulica* (Férussac, 1821) mollusk. For the research, a shell with geometric dimensions from 2 to 5 mm, pre-washed and crushed on a jaw crusher, was used both in its native form and modified with a sodium hydroxide solution with a concentration of 10 % and treated with ultrasound at a frequency of 40 kHz. A static sorption capacity was determined for all materials, which was 37 mg/g for native material, 31 mg/g modified with sodium hydroxide, and 17 mg/g modified with ultrasound. Linearized isotherms of sorption of cobalt ions are constructed according to the Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radostkevich, and Temkin models. The sorption equilibrium constants and the values of the limiting sorption are calculated according to these models. It is revealed that the sorption of cobalt ions is satisfactorily described by the Langmuir, Freundlich, and Temkin models for both native and modified shells and has a physical character. The Dubinin-Radostkevich model is not suitable for describing the sorption of the studied materials, since the correlation coefficient was less than 0.2. Activation with sodium hydroxide and ultrasound is impractical, since it leads to a decrease in the sorption capacity of the material by 1.2 and 2.2 times, respectively.

**Keywords:** adsorption, cobalt ions, shellfish, water pollution.

Соединения тяжёлых металлов (ТМ) при попадании в окружающую среду могут аккумулироваться в организмах и приводить к нарушениям обменных процессов, функционирования иммунной и других систем [1]. Кобальт относится к числу наиболее распространённых ТМ, загрязняющих биосферу вследствие сбросов недостаточно очищенных сточных вод предприятий машиностроения, химической промышленности. В природной среде соединения кобальта могут накапливаться в тканях растений [2–6], донных отложениях водоёмов [7, 8], рыбе, особенно её костной ткани [9], а также в моллюсках [10]. Накопление кобальта в живых организмах приводит к изменению биохимических процессов в них и, как следствие, к снижению биоразнообразия экосистем.

Естественная способность моллюсков и ракообразных накапливать ТМ, вероятно, обусловлена наличием в них хитина, который может выступать в роли биополимера с высокой способностью к поглощению поллютантов [11–15], что может быть основанием для получения на их основе сорбционных материалов для удаления металлов из воды.

Цель данной работы – изучение преобладающего механизма сорбции ионов кобальта раковиной моллюска *Lissachatina fulica* (Férussac, 1821).

### Объекты и методы исследования

Авторами изучался процесс сорбции ионов кобальта на нативных и модифицированных раковинах сухопутного моллюска ахатины гигантской *Lissachatina fulica* (Férussac, 1821). В отечественной и зарубежной литературе практически отсутствуют сведения о сорбционной способности в отношении ионов ТМ раковинами этого моллюска. Вместе с тем, данный вид широко распространён в Африке, Евразии, Северной и Южной Америке. В настоящее время *L. fulica* часто разводится любителями в домашних условиях. При отмирании моллюсков остаётся значительное количество раковин, не находящихся применения в каком-либо производстве. В связи с этим, изучение сорбции кобальта раковинами *L. fulica* представляет актуальную научную задачу. В исследованиях использовали раковины моллюсков, выращенных в лабораторных условиях и не испытывающих влияния загрязнения окружающей среды соединениями металлов. Предварительно раковины отмывали водой и просушивали, после чего измельчали на

щёковой дробилке и просеивали на вибросите. Для изучения сорбционных характеристик отбирали фракцию с размером частиц 2–5 мм. Отдельно проводили модифицирование раковин двумя способами – выдерживанием в растворе гидроксида натрия с концентрацией 10 % в течение 60 мин и активацию ультразвуком частотой 40 кГц в течение 20 мин.

Изучение сорбционной способности проводили на модельных растворах сульфата кобальта, который готовили растворением навески кристаллогидрата  $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  в дистиллированной воде. Концентрацию ионов кобальта в растворах определяли фотометрически согласно ПНД Ф 14.1:2.44-96. Сорбционная ёмкость в статических условиях определялась на растворах с концентрацией ионов кобальта от 10 до 2500 мг/дм<sup>3</sup> при постоянной температуре. Выбор верхнего предела изучаемых концентраций (2500 мг/дм<sup>3</sup>) обусловлен достижением при этой концентрации предельной сорбционной ёмкости.

В колбы с раствором сульфата кобальта объёмом 0,1 дм<sup>3</sup> добавляли по 1 г сорбента в воздушно-сухом состоянии и перемешивали их в течение 60 мин до установления химического равновесия. Количество поглощённых ионов кобальта высчитывали по разнице между исходными и равновесными концентрациями в жидкой фазе.

Величину сорбционной ёмкости (А) высчитывали по формуле:

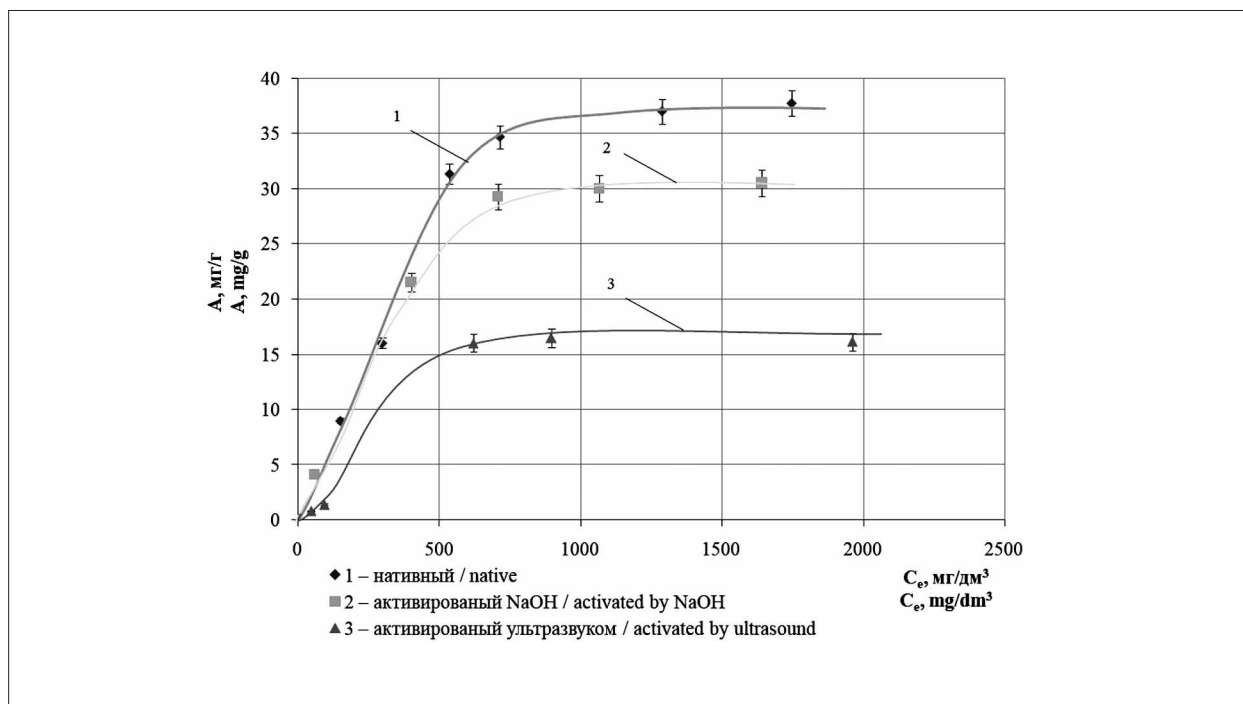
$$A = \frac{(C_s - C_e)V}{m} \quad (1)$$

где  $C_s$  – начальная концентрация ионов кобальта в растворе, мг/дм<sup>3</sup>;  $C_e$  – равновесная концентрация сорбата, мг/дм<sup>3</sup>;  $m$  – масса навески раковин, г;  $V$  – объём раствора (0,1 дм<sup>3</sup>).

В параллельных экспериментах относительная погрешность между полученными данными составляла не более 30 %. Для полученных в результате исследований данных рассчитывали стандартное среднеквадратическое отклонение.

### Результаты и обсуждение

Процесс адсорбции раковинами моллюсков металлов, в частности кобальта, является сложным для описания, поскольку в состав раковин, помимо минеральной части, чаще всего представленной кальцитом, входит несколько сложных органических соединений, в частности полисахариды (хитин), липиды и белки (конхиолин), углеводы [16].



**Рис. 1.** Зависимость сорбционной ёмкости (A) от равновесной концентрации (C<sub>e</sub>) ионов кобальта на раковинах моллюска *L. fulica*  
**Fig. 1.** Dependence of the sorption capacity (A) on the cobalt ions' equilibrium concentration (C<sub>e</sub>) on *L. fulica* shell

Полученные экспериментальные данные по сорбции ионов кобальта раковинами *L. fulica* были использованы для построения изотерм сорбции (рис. 1).

Как видно из рисунка 1, нативный материал обладает наиболее высокой сорбционной ёмкостью по отношению к кобальту (37 мг/г), активация гидроксидом натрия уменьшает её до 30 мг/г, а ультразвуком – до 17 мг/г. Снижение ёмкости модифицированных сорбентов может быть связано с потерей активных центров, ответственных за связывание ионов металлов, в структуре раковин при модификации. Полученные изотермы имеют резко возрастающий характер при низких равновесных концентрациях, что предполагает сильное межмолекулярное взаимодействие в веществе сорбата и позволяет отнести их к типу L2 по классификации Гильса [17].

При исследовании механизма адсорбции следует отметить сложившуюся тенденцию использования нескольких моделей, что позволяет более объективно характеризовать явления на границе сорбент-сорбат. Описание сорбционного процесса проводилось с применением моделей Ленгмюра, Фрейндлиха, Дубинина-Радушкевича и Тёмкина. Адекватность моделей оценивали по величине коэффициента аппроксимации R<sup>2</sup>.

Описание процесса сорбции с использованием изотермы Ленгмюра основано на предположении, что элементарные участки, имеющиеся на поверхности адсорбента, могут сорбировать только одну молекулу сорбата, а количество сорбционных центров эквивалентно количеству сорбируемого вещества. Процесс при этом является обратимым и равновесным. Уравнение Ленгмюра обычно используют в следующем виде:

$$A = \frac{A_{\infty} \cdot K_L \cdot C_e}{(1 + K_L \cdot C_e)} \quad (2)$$

где A – сорбционная ёмкость, мг/г, C<sub>e</sub> – равновесная концентрация сорбата, мг/дм<sup>3</sup>; K<sub>L</sub> – константа сорбционного равновесия, характеризующая интенсивность сорбции, дм<sup>3</sup>/мг; A<sub>∞</sub> – предельное количество сорбированного вещества, мг/г.

Уравнение (2) линеаризуется в координатах 1/A = f(1/C<sub>e</sub>) и может быть представлено следующим образом:

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{A_{\infty}} + \frac{1}{K_L \cdot A \cdot C_e} \quad (3)$$

В результате обработки экспериментальных данных по модели Ленгмюра были получены зависимости, представленные на рисунке 2.

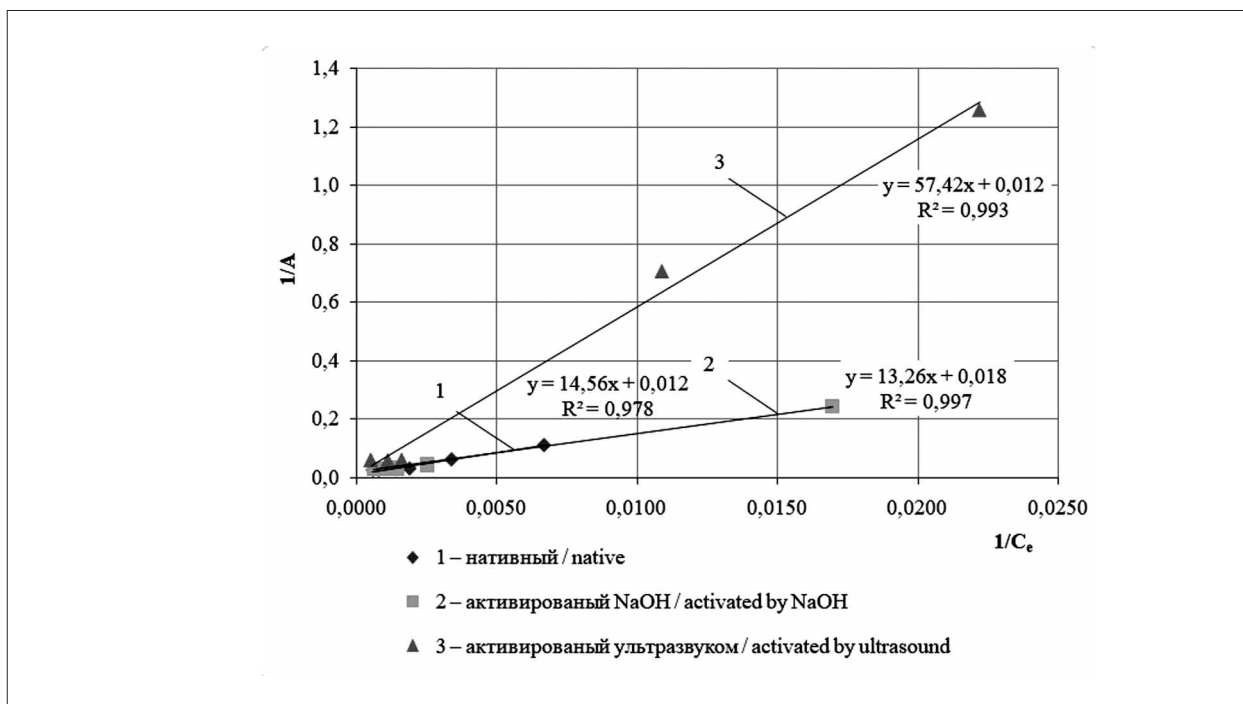


Рис. 2. Линеаризованные изотермы сорбции ионов кобальта раковинами моллюска *L. fulica* по модели Ленгмюра  
 Fig. 2. Linearized isotherms of cobalt ions sorption by *L. fulica* shell

Таблица 1 / Table 1

Рассчитанные значения максимальной сорбционной ёмкости ( $A_{\infty}$ ) и константы сорбционного равновесия ( $K_L$ ) по модели Ленгмюра / Calculated values of the maximum sorption capacity ( $A_{\infty}$ ) and the sorption equilibrium constant ( $K_L$ ) according to the Langmuir model

Вид материала / Type of material	$A_{\infty}$ , мг/г / mg/g	$K_L$ , дм <sup>3</sup> /мг / dm <sup>3</sup> /mg
Нативный / Native	80,6	0,0009
Активированный NaOH / Activated by NaOH	53,2	0,0014
Активированный ультразвуком / Activated by ultrasound	82,6	0,0002

Как видно из рисунка 2, значения коэффициента аппроксимации  $R^2$  линейных зависимостей достаточно высоки, что позволяет предполагать мономолекулярный характер сорбции, значения рассчитанных при этом максимальной адсорбции и константы сорбционного равновесия приведены в таблице 1.

Рассчитанные значения максимальной адсорбции  $A_{\infty}$  (табл. 1) для всех изученных сорбционных материалов оказались значительно выше экспериментально найденных (рис. 1). Константы адсорбционного равновесия  $K_L$  оказались невысокими, что характеризует слабое взаимодействие ионов кобальта с адсорбентом.

Модель Фрейндлиха используется для описания сорбции на гетерогенной поверхности и исходит из предположения, что сорбционные центры обладают различными величинами энергии и в первую очередь происходит заполнение тех из них, которые обладают

максимальной энергией. Данная модель математически выражается следующим образом:

$$A = K_F \cdot C_e^n, \quad (4)$$

где  $K_F$  – константа равновесия уравнения Фрейндлиха, которая отражает относительную сорбционную способность,  $n$  – параметр, указывающий на интенсивность взаимодействия адсорбент-адсорбат.

Уравнение 4 линеаризуется в координатах  $\lg A = f(\lg C_e)$  и может быть представлено в виде:

$$\lg A = \lg K_F + n \cdot \lg C_e. \quad (5)$$

Построенные в координатах  $\lg A$  от  $\lg C_e$  линеаризованные изотермы сорбции ионов кобальта на нативных и модифицированных раковинах моллюска представлены на рисунке 3.

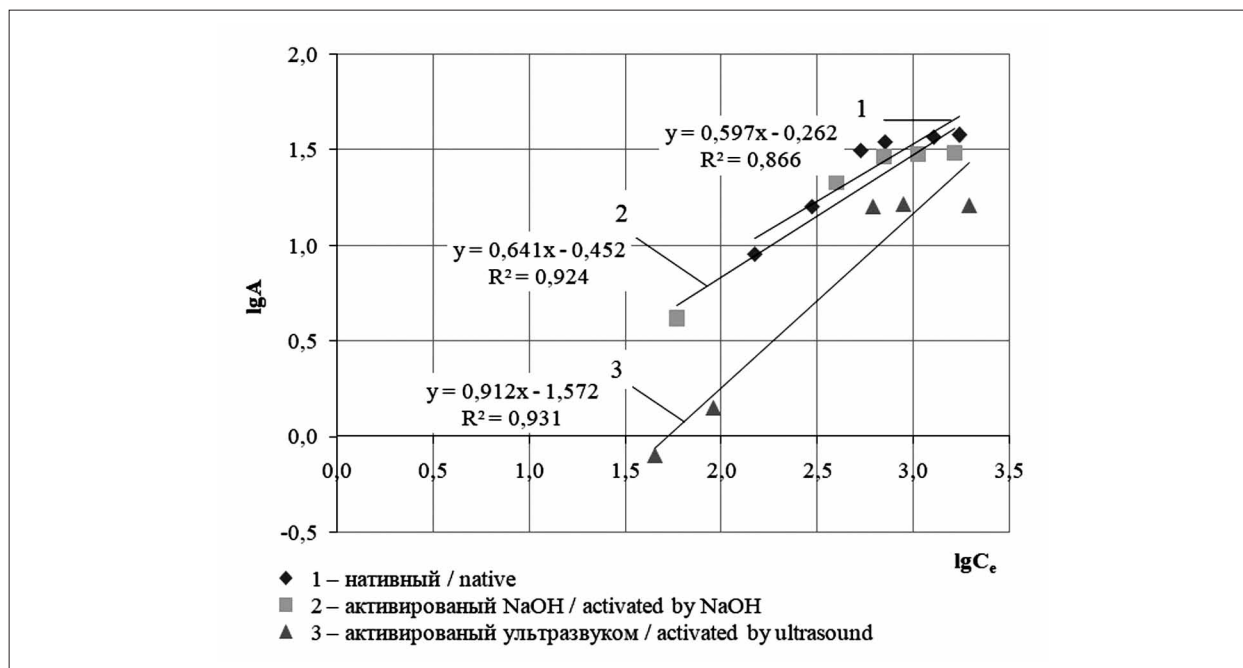


Рис. 3. Линеаризованные изотермы сорбции ионов кобальта раковинами моллюска *L. fulica* по модели Фрейндлиха  
 Fig. 3. Linearized isotherms of cobalt ions' sorption by *L. fulica* shell according to the Freundlich model

Таблица 2 / Table 2

Рассчитанные значения константы сорбционного равновесия  $K_F$  и параметра  $n$  по модели Фрейндлиха / Calculated values of the sorption equilibrium constant  $K_F$  and parameter  $n$  according to the Freundlich model

Вид материала / Type of material	$K_F$	$n$	$1/n$
Нативный / Native	0,547	1,673	0,60
Активированный NaOH / Activated by NaOH	2,837	1,559	0,64
Активированный ультразвуком / Activated by ultrasound	0,027	1,096	0,91

Рассчитанная константа сорбционного взаимодействия  $K_F$  значительно больше у активированного гидроксидом натрия материала, наименьшая – у активированного ультразвуком материала (табл. 2), что несколько противоречит полученным экспериментальным данным, т. к. наибольшая адсорбционная способность выявлена у нативных раковин.

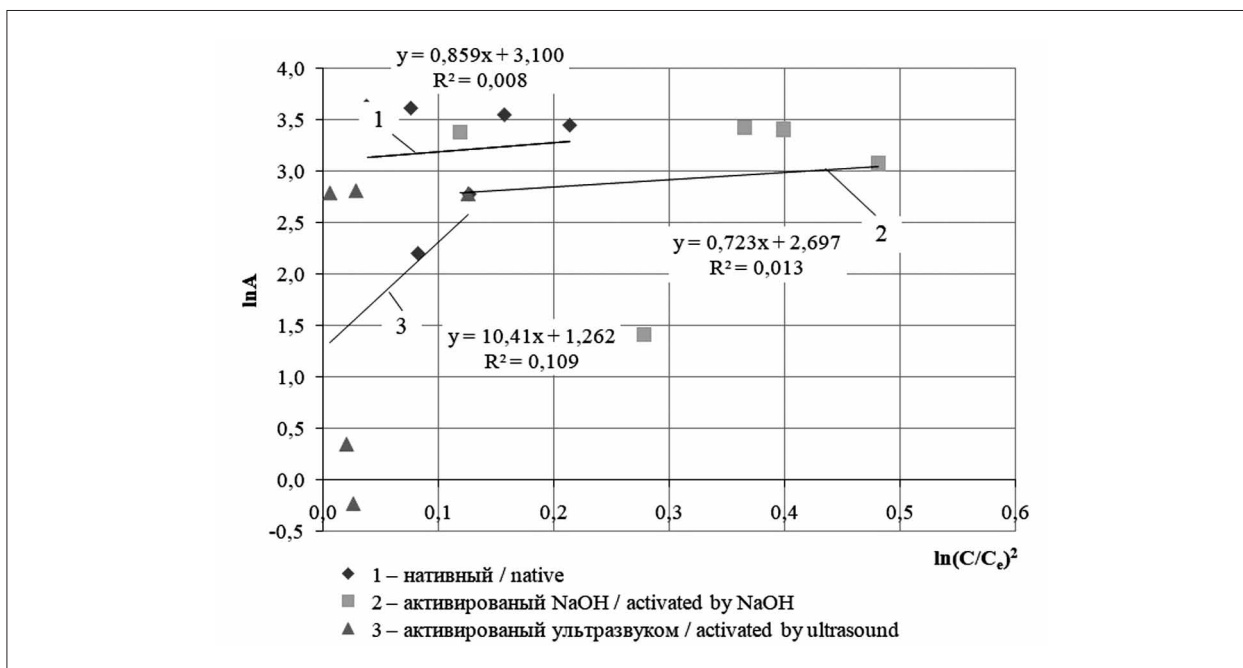
Достаточно высокие значения коэффициентов аппроксимации свидетельствуют об удовлетворительном соответствии экспериментальных данных с теоретическими положениями модели Фрейндлиха. Для всех зависимостей рассчитанные значения коэффициента  $n$  оказались больше 1, что позволяет предполагать, что катионы кобальта в первую очередь заполняют сорбционные центры с более высокой связывающей способностью, и прочность сцепления уменьшается с увеличением степени заполнения. Значение параметра  $1/n$  даёт представление о том, насколько

интенсивны процессы адсорбции: рассчитанные значения данного параметра находятся в диапазоне от 0,5 до 1,0, следовательно, процесс протекает довольно сложно [18]. При этом величину  $1/n$  можно рассматривать как показатель неоднородности сорбционных центров и при приближении её к 1 их неоднородность возрастает. Из полученных данных видно, что наибольшей неоднородностью сорбционных центров обладает активированный ультразвуком материал.

Для процесса сорбции на твёрдых микропористых сорбентах используется модель Дубинина-Радушкевича, которая описывается уравнением 6 и линеаризуется в координатах  $\ln A = f(\ln(C_s/C_e))^2$ :

$$A = A_{\infty} \exp\left(-\frac{R \cdot T}{E} \frac{C_s}{C_e}\right)^2, \quad (6)$$

где  $C_s$  – начальная концентрация адсорбата, мг/дм<sup>3</sup>;  $R$  – универсальная газовая



**Рис. 4.** Линеаризованные изотермы сорбции ионов кобальта раковинами моллюска *L. fulica* по модели Дубинина-Радушкевича  
**Fig. 4.** Linearized isotherms of cobalt ions' sorption by *L. fulica* shell according to the Dubinin-Radzhdankevich model

**Таблица 3 / Table 3**

Рассчитанные значения предельной адсорбции  $A_{\infty}$  и энергии адсорбции  $E$  по модели Дубинина-Радушкевича / Calculated values of the limiting adsorption  $A_{\infty}$  and the adsorption energy  $E$  according to the Dubinin-Radustkevich model

Материал / Type of material	$A_{\infty}$ , мг/г / mg/g	$E$ , кДж/моль / kJ/mol
Нативный / Native	22,2	2691
Активированный NaOH / Activated by NaOH	3,5	773
Активированный ультразвуком / Activated by ultrasound	14,8	2933

постоянная;  $T$  – абсолютная температура,  $K$ ;  $E$  – энергия адсорбции.

Модель позволяет установить физический или химический характер сорбции и является более общей по отношению к модели Ленгмюра, т. к. не предполагает гомогенности поверхности и постоянства адсорбционного потенциала. Обработка изотерм сорбции по модели Дубинина-Радушкевича позволяет определять природу адсорбционных сил, удерживающих частицы сорбата в порах сорбента, по величине вычисленной средней свободной энергии адсорбции [19].

Линеаризованные изотермы сорбции ионов кобальта на нативном и модифицированном материале по модели Дубинина-Радушкевича представлены на рисунке 4.

Отмечено, что экспериментально полученные точки не укладываются в прямолинейную зависимость, коэффициенты корреляции составили от 0,0132 до 0,1092 (рис. 4). Таким

образом, сорбция катионов кобальта не может быть объяснена объёмным заполнением микропор в раковинах моллюсков. Тем не менее, для данной модели были рассчитаны значения предельной адсорбции и энергии адсорбции (табл. 3). Как видно, предельная адсорбция значительно меньше, чем зафиксированная экспериментально и полученная расчётным путём по модели Ленгмюра. Рассчитанная энергия адсорбции во всех случаях оказалась значительно больше 16 кДж/моль, что не позволяет использовать модель Дубинина-Радушкевича для изучаемых сорбционных материалов.

Модель Тёмкина относится к случаю мономолекулярной адсорбции на неоднородной поверхности адсорбента. Она предполагает, что теплота адсорбции всех молекул линейно снижается по мере заполнения слоя из-за отталкивания адсорбатом, при этом адсорбция происходит с равномерным распределением

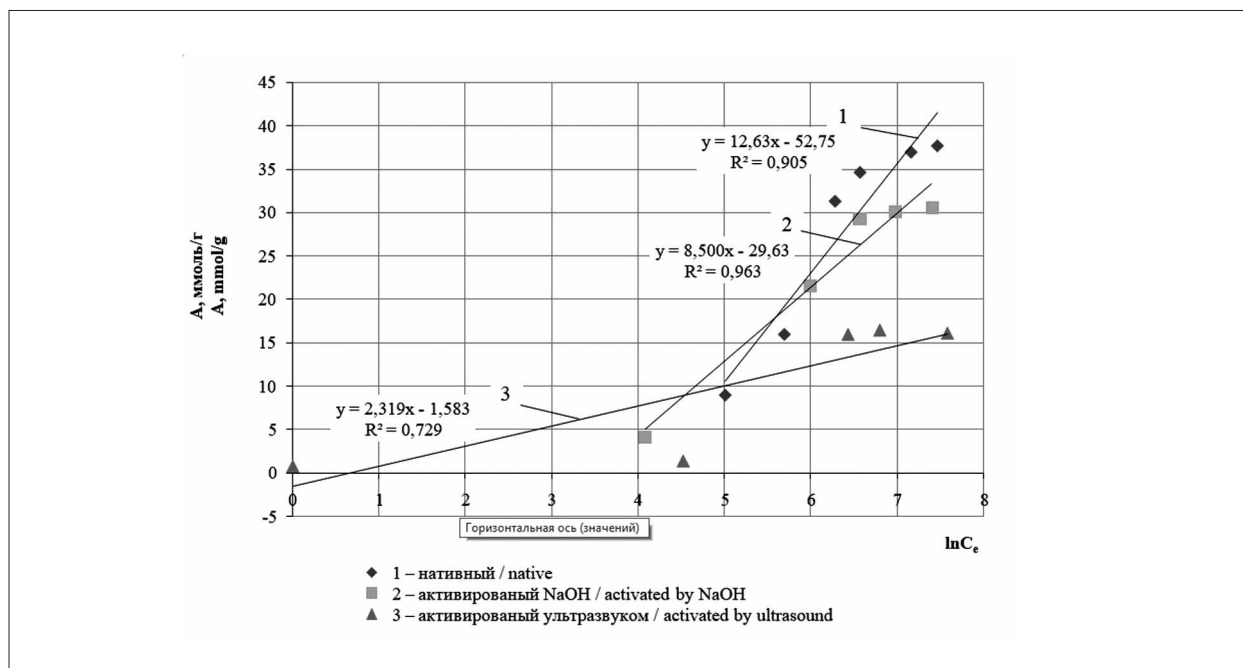


Рис. 5. Линеаризованные изотермы сорбции ионов кобальта раковинами моллюска *L. fulica* по модели Тёмкина  
 Fig. 5. Linearized isotherms of cobalt ions' sorption by *L. fulica* shell according to the Temkin model

Таблица 4 / Table 4

Рассчитанные значения коэффициентов  $K_T$  и  $K$  по модели Тёмкина  
 Calculated values of the coefficients  $K_T$  and  $K$  according to the Temkin model

Вид материала / Type of material	$K_T$	$K$
Нативный / Native	0,015	197,5
Активированный NaOH / Activated by NaOH	0,031	293,4
Активированный ультразвуком / Activated by ultrasound	0,505	1075,3

максимальной энергии связывания. Кроме того, модель предполагает, что снижение теплоты адсорбции происходит в большей степени по линейному закону, чем по логарифмическому и в линеаризованном виде описывается следующим образом:

$$A = \frac{R \cdot T}{K} \ln K_T + \frac{R \cdot T}{K} \ln C_e, \quad (7)$$

где  $K$  – константа, характеризующая теплоту адсорбции (Дж/моль);  $K_T$  – константа Тёмкина (константа сорбционного равновесия, соответствующая максимальной энергии связывания),  $\text{дм}^3/\text{мг}$ .

Построение изотерм сорбции в линейных координатах уравнения Тёмкина (рис. 5) показало неприменимость данной модели (коэффициент аппроксимации составил 0,73–0,96) для описания сорбции кобальта из водных растворов всеми образцами изученных материалов в области концентраций ионов кобальта 200–2100  $\text{мг}/\text{дм}^3$ . Теоретически рассчитанные

константы адсорбции  $K$  для каждого материала представлены в таблице 4. В расчётах температура была принята равной 300 К.

Невысокие значения коэффициента аппроксимации в линеаризованной форме изотермы (рис. 5) свидетельствуют о слабом взаимодействии между адсорбированными ионами кобальта и энергетической гетерогенностью адсорбционных центров.

### Заключение

На основании проведённых исследований можно сделать вывод о возможности использования раковин моллюска *L. fulica* для извлечения ионов кобальта из воды. Проведение активации нативного сорбента гидроксидом натрия и ультразвуком нецелесообразно, поскольку приводит к снижению сорбционной ёмкости материала в 1,2 и 2,2 раза соответственно.

Сорбция ионов кобальта удовлетворительно описывается моделями Ленгмюра,

Фрейндлиха и Тёмкина как для нативного материала, так и для модифицированных и имеет физический характер. Модель Дубинина-Радушкевича не подходит для описания сорбции исследуемых материалов.

### Литература

1. Гулиева С.В., Керимова Р.Дж., Юсифова М.Ю. Влияние тяжёлых металлов на биохимические процессы в организме человека // *Academy*. 2018. № 12 (39). С. 77–81.
2. Немерешина О.Н., Петрова Г.В., Филиппова А.В. Содержание кобальта и кадмия в тканях растений техногенной зоны // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2020. № 4 (52). С. 80–87. doi: 10.18286/1816-4501-2020-4-80-87
3. Немерешина О.Н., Гусев Н.Ф. Накопление кобальта и кадмия в растительном сырье и почвах техногенных зон // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2020. № 3 (83). С. 122–126. doi: 10.37670/2073-0853-2020-83-3-122-126
4. Немерешина О.Н., Гусев Н.Ф. Особенности поглощения и распределения тяжёлых металлов из почвы и сточных вод в техногенной зоне в тканях растений // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2024. № 5 (109). С. 90–97. doi: 10.37670/2073-0853-2024-109-5-90-97
5. Науменко О.А., Соколова О.Я., Кабышева М.И., Бибарцева Е.В. Характеристика видовых особенностей накопления марганца, цинка и кобальта древесными растениями Оренбуржья // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2018. № 1 (69). С. 91–93.
6. Сибиркина А.Р., Лихачев С.Ф. Сравнение содержания соединений кобальта в органах и тканях древесных растений // *Самарский научный вестник*. 2017. Т. 6. № 2 (19). С. 84–87.
7. Чуйко Е.В. Влияние содержания тяжёлых металлов в донных отложениях на их биоаккумуляцию в ихтиофауне // *Астраханский вестник экологического образования*. 2013. № 3 (25). С. 139–144.
8. Макаренко Т.В., Никитин А.Н., Ерофеев М.А. Изучение содержания меди, кобальта и свинца в донных отложениях водоёмов г. Гомеля // *Эпоха науки*. 2020. № 21. С. 300–304. doi: 10.24411/2409-3203-2019-11061
9. Грибовский Ю.Г., Нохрин Д.Ю., Давыдова Н.А., Торчицкий А.Н. Содержание тяжёлых металлов в рыбе из минерализованных водоёмов Урала // *Российский журнал Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии*. 2019. № 4 (32). С. 461–467. doi: 10.25725/vet.san.hyг.ecol.201904019
10. Макаренко Т.В. Изучение накопления тяжёлых металлов в тканях моллюсков в водоёмах и водотоках Гомеля и прилегающих территорий // *Экологический вестник*. 2013. № 2. С. 116–121.
11. Тунакова Ю.А., Мухаметшина Е.С., Шмакова Ю.А. Исследование эффективности биополимерных сорбентов на основе хитина в отношении металлов // *Вестник Казанского технологического университета*. 2011. № 14. С. 141–149.
12. Ловкис З.В., Павлова О.В., Белова Е.А., Трусова М.М. Использование хитозана для очистки природных и сточных вод // *Пищевая промышленность: наука и технологии*. 2023. Т. 16. № 1 (59). С. 53–61. doi: 10.47612/2073-4794-2023-16-1(59)-53-61
13. Реут К.В., Береза И.Г., Василевский П.Б., Деркач С.Р. Способ очистки сточных вод производства хитина из панциря ракообразных // Патент RU 2263079 С1. Заявление: 2004107962/15, 18.03.2004. Дата публикации: 27.10.2005.
14. Касьянов Г.И., Кубенко Е.Г. Разработка технологии получения хитозана из панциря гаммаруса азовского // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 2013. № 1 (331). С. 69–72.
15. Солдатова С.Ю. Разработка технологии получения хитозана из панцирьсодержащего сырья // *Вестник Нижневартковского государственного университета*. 2015. № 1. С. 48–56.
16. de Paula S.M., Silveira M. Studies on molluscan shells: contributions from microscopic and analytical methods // *Micron*. 2009. V. 40. No. 7. P. 669–690. doi: 10.1016/j.micron.2009.05.006
17. Адсорбция из растворов на поверхностях твёрдых тел / под ред. Г. Парфита, К. Рочестера. М.: Мир, 1986. 488 с.
18. Халил А.С., Серпокрьлов Н.С., Смоляниченко А.С., Старовойтов С.В. Математическое описание сорбции на модифицированной рисовой соломе // *Инженерный вестник Дона*. 2018. № 1 [Электронный ресурс] <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4650> (дата обращения 10.03.2025).
19. Шумилова М.А. Применение моделей адсорбции при исследовании поглощения ионов никеля почвой // *Теоретическая и прикладная экология*. 2024. № 3. С. 45–53. doi: 10.25750/1995-4301-2024-3-045-053

### References

1. Guliyeva S.V., Kerimova R.D., Yusifova M.Y. The influence of heavy metals on biochemical processes in the human body // *Academy*. 2018. No. 12 (39). P. 77–81 (in Russian)
2. Nemereshina O.N., Petrova G.V., Filippova A.V. Cobalt and cadmium content in plant tissues of technogenic zone // *Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy*. 2020. No. 4(52). P. 80–87 (in Russian). doi: 10.18286/1816-4501-2020-4-80-87
3. Nemereshina O.N., Gusev N.F. Accumulation of cobalt and cadmium in plants and soils of technogenic zones // *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2020. No. 3 (83). P. 122–126 (in Russian). doi: 10.37670/2073-0853-2020-83-3-122-126

4. Nemereshina O.N., Gusev N.F. Features of absorption and distribution of heavy metals from soil and wastewater in the technogenic zone in plant tissues // *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2024. No. 5 (109). P. 90–97 (in Russian). doi: 10.37670/2073-0853-2024-109-5-90-97
5. Naumenko O.A., Sokolova O.Ya., Kabysheva M.I., Bibartseva Ye.V. Specific features of manganese, zinc and cobalt accumulation by woody plants in the Orenburg region // *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2018. No. 1 (69). P. 91–93 (in Russian).
6. Sibirskina A.R., Likhachev S.F. Comparison of cobalt compounds content in organs and tissues of woody plants // *Samara Journal of Science*. 2017. V. 6. No. 2 (19). P. 84–87 (in Russian).
7. Chuiko E.V. The influence of heavy metal content in bottom sediments on their bioaccumulation in ichthyofauna // *Astrakhan Bulletin of Ecological Education*. 2013. No. 3 (25). P. 139–144 (in Russian).
8. Makarenko T.V., Nikitin A.N., Erofeenko M.A. Study of the content of copper, cobalt and lead in the bottom sediments of ponds in Gomel city // *Epoha nauki*. 2020. No. 21. P. 300–304 (in Russian). doi: 10.24411/2409-3203-2019-11061
9. Gribovsky Yu.G., Nohrin D.Yu., Davydova N.A., Torchitsky A.N. Content of heavy metals in fish from mineralized Ural water bodies // *Rossijskij zhurnal Problemy veterinarnoj sanitarii, gigieny i ekologii*. 2019. No. 4 (32). P. 461–467 (in Russian). doi: 10.25725/vet.san.hyg.ecol.201904019
10. Makarenko T.V. Heavy metals accumulation in mollusks' of Gomel reservoirs and its adjacent territories // *Ekologicheskij vestnik*. 2013. No. 2. P. 116–121 (in Russian).
11. Tunakova Yu.A., Mukhametshina E.S., Shmakova Yu.A. Investigation of the effectiveness of chitin-based biopolymer sorbents against metals // *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2011. No. 14. P. 141–149. (in Russian).
12. Lovkis Z.V., Pavlova O.V., Belova E.A., Trusova M.M. Use of chitosan for natural and waste water treatment // *Food Industry: Science and Technologies*. 2023. V. 16. No. 1 (59). P. 53–61 (in Russian). doi: 10.47612/2073-4794-2023-16-1(59)-53-61
13. Reut K.V., Bereza I.G., Vasilevsky P.B., Derkach S.R. Method of purification of sewage at production of chitine from carapaces of crustacea // Patent No. 2263079 C1. Application: 2004107962/15, 18.03.2004. Date of publication 27.10.2005 (in Russian).
14. Kasyanov G.I., Kubenko E.G. Production technology development of chitosan from shell of Gammarus crustacean's Azov sea // *Izvestiya vuzov. Food Technology*. 2013. No. 1 (331). P. 69–72 (in Russian).
15. Soldatova S.Yu. Technology of producing chitosan from shell-containing materials // *Bulletin of Nizhnevar-tovsk State University*. 2015. No. 1. P. 48–56 (in Russian).
16. de Paula S.M., Silveira M. Studies on molluscan shells: contributions from microscopic and analytical methods // *Micron*. 2009. V. 40. No. 7. P. 669–690. doi: 10.1016/j.micron.2009.05.006
17. Adsorption from solutions on solid surfaces / Eds. G. Parfit, K. Rochester. Moskva: Mir, 1986. 488 p. (in Russian).
18. Khalil A.S., Serpokyrov N.S., Smolyanichenko A.S., Starovoytov S.V. Mathematical description of sorption on modified rice straw // *Engineering Bulletin of Don*. 2018. No. 1 [Internet resource] <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4650> (Accessed: 03.10.2025).
19. Shumilova M.A. Application of adsorption models in the study of nickel ion absorption by soil // *Theoretical and Applied Ecology*. 2024. No. 3. P. 45–53 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-3-045-053