

УДК 544.723:546.95:551.524.2

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.43>**О. М. КАМІНСЬКИЙ**кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри хіміїЖитомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0000-0003-1971-8437**Р. О. ДЕНИСЮК**кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри хіміїЖитомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0000-0003-3077-3795**М. В. ЧАЙКА**кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри хіміїЖитомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0000-0001-5356-9856**С. В. КУЧЕРУК**доктор філософії з галузі знань Хімічна та біоінженерія, доцент,
доцент кафедри хіміїЖитомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0000-0002-5978-487X**Д. Ю. ПАНАСЮК**

асистент кафедри хімії

Житомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0009-0005-9490-1823**О. В. АНІЧКІНА**кандидат педагогічних наук, доцент,
завідувач кафедри хіміїЖитомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0000-0003-4843-0707**О. Ю. АВДЄЄВА**доктор філософії з галузі знань 01 Освіта/Педагогіка, доцент,
доцент кафедри хіміїЖитомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0000-0001-6550-0776**Ю. В. ЛИСЕЦЬКА**старший викладач кафедри англійської філології та перекладу
Житомирський державний університет імені Івана Франка

ORCID: 0000-0002-6747-5858

ПРОЦЕСИ СОРБЦІЇ ІОННИХ ФОРМ НІКЕЛЮ(II) З ВОДНИХ РОЗЧИНІВ НАНОРОЗМІРНИМ МАГНЕТИТОМ

На сучасному етапі розвитку науки та промисловості забруднення навколишнього середовища, зокрема водою, вважається однією з найважливіших глобальних проблем людства. Зокрема, однією з ключових цілей на 2030 рік у країнах ЄС є гарантування доступності та довгострокового забезпечення водопостачання та санітарії для всіх, як це зазначено в шостій цілі сталого розвитку (ЦСР), тому пошук ефективних методів очистки води до стану питної залишається актуальним питанням сьогодення.

© Камінський О. М., Денисюк Р. О., Чайка М. В., Кучерук С. В., Панасюк Д. Ю., Анічкіна О. В., Авдєєва О. Ю.,
Лисецька Ю. В., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

У даній роботі виконано синтез нанорозмірного магнетиту золь-гель методом Елмора. Методами рентгенівської спектроскопії ідентифіковано фази Fe_3O_4 . Методом Шеррера розраховано, що середній розмір частинок магнетиту становить 75,93 нм.

Визначено, що ступінь вилучення іонних форм Нікелю(II) з водних розчинів 57,5 % досягається протягом перших 40–50 хвилин від початку контакту між компонентами. Сорбційна рівновага настає протягом 60 хвилин від початку контакту на межі поділу фаз. Показано, що кінетику сорбції іонних форм Нікелю(II) з розчину поверхнею магнетиту можна описати моделлю псевдо-другого порядку Хо-Маккея, яка вказує на міжчастинкову взаємодію між іонами сорбату на межі поділу фаз за рахунок міжмолекулярних сил.

Встановлено, що характер кривої ізотерми нагадує криві ізотерм Ленгмюра (L2-тип) відповідно до класифікації Гільса з виходом на насичення, а сорбційна ємність становить 19,2 мг/г.

Показано, що ізотерма адсорбції іонних форм Нікелю(II) задовільно описується моделлю Ленгмюра, в порівнянні з іншими моделями, що можна побачити з величини коефіцієнта кореляції ($R^2 = 0,997$), тобто адсорбція іонних форм Нікелю(II) відбувається на гомогенних (однорідних) центрах поверхні магнетиту, де всі активні центри є енергетично однорідними і на поверхні може утворюватись лише мономолекулярний шар сорбату.

Розрахована енергія адсорбції за рівнянням Дубініна-Радушкевича для поверхні адсорбенту не перевищує 2 кДж/моль, що вказує на фізичну адсорбцію іонних форм Нікелю(II) з водних розчинів поверхнею магнетиту.

Ключові слова: іонні форми Нікелю(II), магнетит, сорбція, кінетика сорбції, ізотерми сорбції, моделі ізотерм, фізична та колоїдна хімія.

O. M. KAMINSKIY

Ph.D. in Chemistry, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0000-0003-1971-8437

R. O. DENYSIUK

Ph.D. in Chemistry, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0000-0003-3077-3795

M. V. CHAYKA

Ph.D. in Chemistry, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0000-0002-5978-487X

S. V. KUCHERUK

Ph.D. in the Field of Knowledge "Chemical and Bioengineering",
Associate Professor, Associate Professor at the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0000-0002-5978-487X

D. YU. PANASIUK

Assistant at the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0009-0005-9490-1823

O. V. ANICHKINA

Ph.D. in Pedagogical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0000-0003-4843-0707

O. YU. AVDIEIEVA

Ph.D. in the Field of Knowledge 01 Education/Pedagogy, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0000-0001-6550-0776

YU. V. LYSETSKA

Senior Lecturer at the Department of English Philology and Translation

Zhytomyr Ivan Franko State University

ORCID: 0000-0002-6747-5858

PROCESSES OF SORPTION OF IONIC FORMS OF NICKEL(II) FROM AQUEOUS SOLUTIONS BY NANOSIZED MAGNETITE

At the current stage of development of science and industry, environmental pollution, in particular water bodies, is considered one of the most important global problems of mankind. In particular, one of the key goals for 2030 in the EU countries is to guarantee accessibility and long-term provision of water supply and sanitation for all, as stated in the sixth goal of sustainable development (SDG), therefore, the search for effective methods of purifying water to a drinking state remains an urgent issue of today.

In this work, the synthesis of nanosized magnetite sol-gel by the Elmore method was performed. The Fe_3O_4 phases were identified by X-ray spectroscopy methods. The average size of magnetite particles was calculated by the Scherrer method to be 75.93 nm.

It was determined that the degree of extraction of ionic forms of Nickel(II) from aqueous solutions of 57.5 % is achieved during the first 40–50 minutes from the beginning of contact between the components. Sorption equilibrium occurs within 60 minutes from the beginning of contact at the interface. It is shown that the kinetics of sorption of ionic forms of Nickel(II) from a solution by the magnetite surface can be described by the pseudo-second-order Ho-McKay model, which indicates interparticle interaction between sorbate ions at the phase interface due to intermolecular forces.

It was established that the character of the isotherm curve resembles the Langmuir isotherm curves (L2-type) according to the Giles classification with saturation, and the sorption capacity is 19.2 mg/g.

It is shown that the adsorption isotherm of ionic forms of Nickel(II) is satisfactorily described by the Langmuir model, in comparison with other models, which can be seen from the value of the correlation coefficient ($R^2 = 0.997$), i.e. the adsorption of ionic forms of Nickel(II) occurs on homogeneous (homogeneous) centers of the magnetite surface, where all active centers are energetically homogeneous and only a monomolecular layer of sorbate can form on the surface. The calculated adsorption energy according to the Dubinin-Radushkevich equation for the adsorbent surface does not exceed 2 kJ/mol, which indicates the physical adsorption of ionic forms of Nickel(II) from aqueous solutions by the magnetite surface.

Key words: ionic forms of Nickel(II), magnetite, sorption, sorption kinetics, sorption isotherms, isotherm models, physical and colloidal chemistry.

Постановка проблеми

На сучасному етапі розвитку технологій очистки водойм процеси сорбції займають достойне місце, оскільки вони є досить ефективними через простоту використання, різноманітність сорбентів, високу швидкість процесу, економічність тощо.

Сорбційне вилучення забруднювачів, таких як іони важких металів, досить широко використовують у роботі ефективних методів очистки забруднених та стічних промислових водойм.

До найбільш поширених іонів важких металів, які потрапляють до водойм з тих чи інших джерел, можна віднести іони Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} та інші. Надзвичайно шкідливий вплив іонів важких металів на флору і фауну давно відомий, тому пошук ефективних методів очистки водойм від іонів важких металів залишається актуальним завданням. Також проблема чистої води в Україні ще більш загострюється через воєнні дії, наслідком яких є потрапляння до водойм забруднювачів, що містять важкі метали.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботі [1] здійснено синтез магнітного біовугілля (MJRB) із шкаралупи *Juglans Regia* та використано у якості адсорбенту для вилучення іонів Cu^{2+} та Ni^{2+} з водних розчинів. Встановлено, що ступінь вилучення іонів Cu^{2+} та Ni^{2+} становить 98,30 % та 98,10 % відповідно, а адсорбційна ємність за оптимальних умов сорбції становить 16,83 мг/г та 18,11 мг/г відповідно. Показано, що поверхня MJRB має високопористу структуру, що вказує на вищу здатність адсорбувати іони металів. Адсорбент був аморфним і мав розмір кристалітів 3,043 нм. Виявлено, що MJRB володіє помірними магнітними властивостями зі значенням питомої намагніченості насичення 20 етл/г, що є достатнім для вилучення Cu^{2+} та Ni^{2+} з водних розчинів під час магнітної сепарації. Показано, що ізотерми адсорбції узгоджуються з моделлю ізотерми Ленгмюра.

У дослідженні авторами [2] одержано новий потрійний композитний аерогель з використанням хромового фериту ($\text{Cr}_{0.1}\text{Fe}_{2.9}\text{O}_4$), відновленого оксиду графену (rGO) та етилендіамінтетраоцтової кислоти (ЕДТА). Отриманий нанокompозит використано для адсорбції іонів Cu^{2+} та Ni^{2+} з водних розчинів. Визначено оптимальні умови адсорбції (вплив рН, маси адсорбенту та інше). Визначено, що адсорбційна ємність 310,81 мг/г для Cu^{2+} була досягнута з використанням 45 мг адсорбенту при рН = 5 та температурі 25 °С, а якщо рН підвищити до 6, а температуру до 35 °С, то адсорбційна ємність 45 мг адсорбенту для Ni^{2+} збільшується до 316,25 мг/г. Показано, що процес адсорбції Cu^{2+} та Ni^{2+} аерогелем $\text{Cr}_{0.1}\text{Fe}_{2.9}\text{O}_4/\text{rGO}/\text{EDTA}$ описується кінетичною моделлю псевдо-другого порядку та моделлю

Ленгмюра. Термодинамічні параметри вказують на те, що процес адсорбції є спонтанним ендотермічним процесом. Максимальна адсорбційна ємність адсорбенту для Cu^{2+} та Ni^{2+} становить 334,89 мг/г та 345,52 мг/г відповідно. Визначено, що після п'яти циклів використання ступінь вилучення іонів все ще перевищує 68,99 %.

У оглядовій статті [3] розглянуто процеси біосорбції іонів Mn^{2+} та Ni^{2+} з водних розчинів різноманітними біосорбентами, що виготовлені на основі біомаси водоростей, грибів, лушпиння зелених помідорів, кукурудзяних качанів тощо.

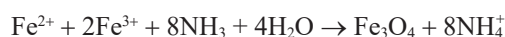
Однак слід відмітити, що джерел, які детально описують процеси сорбції іонних форм Нікелю(II) з водних розчинів поверхнями наношпінелей (серед яких є магнетит) є недостатня кількість, що також аргументовано як актуальність даного дослідження.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є вивчення процесів адсорбції іонних форм Нікелю(II) з водних розчинів поверхнею нанорозмірного магнетиту.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для дослідження адсорбційної активності поверхні нанорозмірного магнетиту проведено золь-гель синтез методом співосадження (Елмора) [4–5] у відповідність до іонної реакції:



Для синтезу використано такі матеріали: $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ марки «ч.д.а.», $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ марки «ч.», 25 % водний розчин NH_3 марки «ч.д.а.».

Одержаний магнетит осаджували в магнітному полі, промивали дистильованою водою до нейтральної реакції та висушували на повітрі протягом декількох діб.

З метою підтвердження структури синтезованого магнетиту проведено дослідження методами рентгенівської спектроскопії (XRD) за допомогою рентгенівського дифрактометра ДРОН-3М (випромінювання міді, лінія $K\alpha$, $\lambda = 0,1540$ нм). Отриману XRD дифрактограму проаналізовано за допомогою програмного забезпечення «MATCH!4».

На рис. 1 зображено дифрактограму магнетиту.

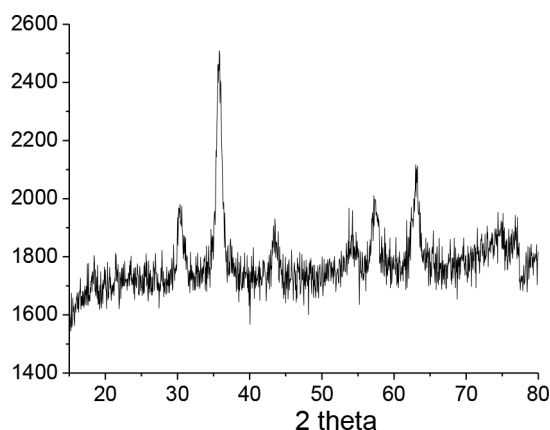


Рис. 1. Дифрактограма магнетиту

Під час аналізу дифрактограми виявлено фазу магнетиту, характеристичні піки якої знаходяться при 30,42; 35,77; 43,50; 53,76; 57,39; 63,09 та 74,64 2θ кутах.

Для розрахунку середнього розміру частинок магнетиту для даних кутів 2θ використано метод Шеррера з використанням формули [6]:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta}, \quad (1)$$

де D – середній розмір частинок, нм; K – константа Шеррера, яка для кристалічних систем має середнє значення 0,92; λ – довжина хвилі рентгенівського випромінювання (лінія $K\alpha = 0,1540$ нм); β – кутова напівширина дифракційного максимуму за характерних індексів Міллера (hkl) для кристалічної решітки; θ – кут рентгенівської дифракції.

У табл. 1 наведено основні розрахункові дані характеристик елементарної комірки та середній розмір частинок магнетиту.

Встановлено, що середній розмір частинок Fe_3O_4 за даними рентгенівської дифракції становить 75,93 нм.

Для дослідження процесів сорбції іонних форм Нікелю(II) з водних розчинів поверхнею магнетиту розчини іонів Ni^{2+} з концентраціями від 10–200 мг/л готували із стандартних водних розчинів нітратних солей з доведенням відповідної аліквоти до мітки в мірній колбі за допомогою ацетатно-аміачного буферу до $\text{pH} = 6,5$ – $8,5$.

Таблиця 1

Основні розрахункові дані характеристик елементарної комірки та середній розмір частинок магнетиту

2θ	$d_{(hkl)}$	hkl	β	D, нм
30,42	2,9462	202	0,969	8,68
35,77	2,5126	311	0,882	9,67
43,50	2,0833	400	0,929	9,41
53,76	1,7010	422	0,019	483,58
57,39	1,6037	511	1,004	9,22
63,09	1,4731	404	0,900	10,58
74,64	1,2708	533	26,293	0,39

Сорбцію іонних форм Нікелю(II) з водних розчинів здійснювали у статичному режимі при рН = 7,9–8,5 за кімнатної температури. До 0,03 г сорбенту додавали 5 мл розчину солі відповідної концентрації і струшували протягом 3 годин на шейкері, далі розчин відділяли від сорбенту за допомогою постійного магніту. Концентрацію іонів Ni^{2+} до та після сорбції визначали атомно-абсорбційним методом за допомогою полум'яного спектрофотометра С-115-ПК у полум'яній суміші ацетилен-повітря за довжини спектральної лінії 232,0 нм.

Сорбційну ємність A (мг/г) поверхні магнетиту розраховували за формулою:

$$A = \frac{(C_0 - C_p) \cdot V}{m}, \quad (2)$$

де C_0 і C_p – концентрація вихідного розчину іонних форм Нікелю(II) та розчину після сорбції (мг/л), V – об'єм розчину (л), m – наважка сорбенту (г).

Ступінь вилучення R , % іонних форм Нікелю(II) з водних розчинів розраховували за формулою:

$$R = \frac{(C_0 - C_p)}{C_0} \cdot 100 \%. \quad (3)$$

Для визначення механізмів сорбції іонних форм Нікелю(II) одержані кінетичні криві проаналізовано відповідно до моделей псевдо-першого порядку Лагергрена та псевдо-другого порядку Хо-Маккея [7].

З метою аналізу ізотерми сорбції іонних форм Нікелю(II) використано математичні моделі адсорбції Ленгмюра, Фрейндліха, Тьомкіна та Дубініна-Радускевича [8–9].

Як відомо з літературних джерел [10], у середовищі ацетатно-аміачного буферу за рН = 7,9–8,5 можуть утворюватися такі іонні форми Нікелю(II):



Для іонів Нікелю(II) характерне утворення комплексів з координаційним числом 4 у водних розчинах, проте також можливе утворення комплексів з координаційним числом 6.

На рис. 2 показано залежність ступеня вилучення іонних форм Нікелю(II) з розчину поверхнею магнетиту від часу контакту.

Як видно з рис. 2, ступінь вилучення 57,5 % досягається протягом перших 40–50 хвилин від початку контакту між компонентами. Адсорбційна рівновага настає протягом 60 хвилин на межі поділу фаз.

Визначено, що кінетику сорбції іонних форм Нікелю(II) з розчину поверхнею магнетиту можна описати моделлю псевдо-другого порядку Хо-Маккея ($R^2 = 0,999$), яка вказує на міжчастинкову взаємодію між іонами сорбату на межі поділу фаз за рахунок міжмолекулярних сил. Лімітуючою стадією процесу сорбції є хімічна реакція обміну між частинками на межі поділу «сорбат-сорбент».

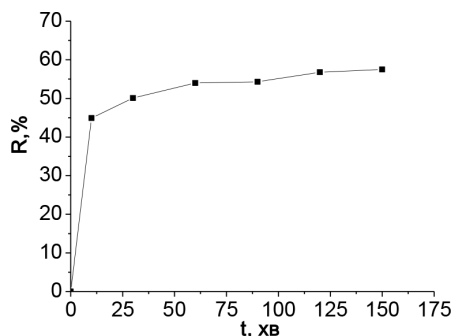


Рис. 2. Залежність ступеня вилучення іонних форм Нікелю(II) з розчину поверхнею магнетиту від часу контакту

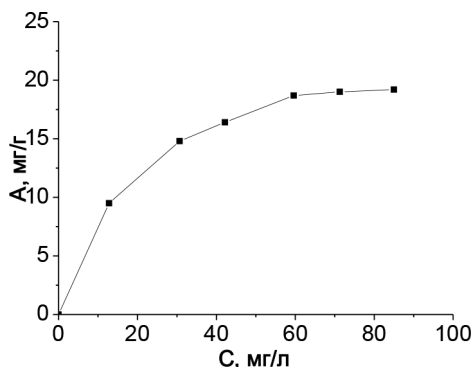


Рис. 3. Ізотерма адсорбції іонних форм Нікелю(II) з розчину поверхнею магнетиту

На рис. 3 зображено ізотеру адсорбції іонних форм Нікелю(II) поверхнею магнетиту.

Встановлено, що характер кривої ізотери нагадує криві ізоTERM Ленгмюра (L2-тип) відповідно до класифікації Гільса [11], з виходом на насичення. Такий тип ізоTERM характерний для сорбентів, на поверхні яких утворюється мономолекулярний шар сорбату. Сорбційна ємність становить 19,2 мг/г.

Одержані експериментальні дані проаналізовано відповідно до моделей ізоTERM Ленгмюра, Фрейндліха, Тьомкіна та Дубініна-Радушкевича.

Показано, що ізоTERMA адсорбції іонних форм Нікелю(II) задовільно описується моделлю Ленгмюра, в порівнянні з іншими моделями, що можна побачити з величини коефіцієнта кореляції ($R^2 = 0,997$), тобто адсорбція іонних форм Нікелю(II) відбувається на гомогенних (однорідних) центрах поверхні магнетиту, де всі активні центри є енергетично однорідними і на поверхні може утворюватись лише мономолекулярний шар сорбату.

Розраховано енергію адсорбції за рівнянням Дубініна-Радушкевича для поверхні магнетиту, яка становить 1,497 кДж/моль. Дана величина вказує на фізичну адсорбцію іонних форм Нікелю(II) з водних розчинів поверхнею магнетиту.

Висновки

У роботі виконано синтез нанорозмірного магнетиту золь-гель методом Елмора. Методами рентгенівської спектроскопії ідентифіковано фази Fe_3O_4 . Методом Шеррера розраховано, що середній розмір частинок магнетиту становить 75,93 нм.

Визначено, що ступінь вилучення іонних форм Нікелю(II) з водних розчинів 57,5 % досягається протягом перших 40–50 хвилин від початку контакту між компонентами. Адсорбційна рівновага настає протягом 60 хвилин на межі поділу фаз. Показано, що кінетику сорбції іонних форм Нікелю(II) з розчину поверхнею магнетиту можна описати моделлю псевдо-другого порядку Хо-Маккея, яка вказує на міжчастинкову взаємодію між іонами сорбату на межі поділу фаз за рахунок міжмолекулярних сил.

Встановлено, що характер кривої ізотери нагадує криві ізоTERM Ленгмюра (L2-тип) відповідно до класифікації Гільса з виходом на насичення, а сорбційна ємність становить 19,2 мг/г (маса сорбенту 0,03 г, об'єм розчину – 5 мл, pH = 7,9–8,5, $C_0(\text{Ni}^{2+}$ у розчині) – 200 мг/л).

Показано, що ізоTERMA сорбції іонних форм Нікелю(II) задовільно описується моделлю Ленгмюра, в порівнянні з іншими моделями, що можна побачити з величини коефіцієнта кореляції ($R^2 = 0,997$), тобто сорбція іонних форм Нікелю(II) відбувається на гомогенних (однорідних) центрах поверхні магнетиту, де всі активні центри є енергетично однорідними і на поверхні може утворитись лише мономолекулярний шар сорбату.

Розрахована енергія сорбції за рівнянням Дубініна-Радушкевича для поверхні адсорбенту не перевищує 2 кДж/моль, що вказує на фізичну адсорбцію іонних форм Нікелю(II) з водних розчинів поверхнею магнетиту.

Список використаної літератури

1. Isaac R., Siddiqui Sh., Aldosari O. F., Uddin M. K. Magnetic biochar derived from *Juglans regia* for the adsorption of Cu^{2+} and Ni^{2+} : Characterization, modelling, optimization, and cost analysis. *Journal of Saudi Chemical Society*. 2023. Vol. 27, Is. 6. 101749. DOI: 10.1016/j.jssc.2023.101749
2. Qiao Y., Zhang S., Ou N., Shen L. Adsorption performance and mechanism of EDTA-modified $\text{Cr}_{0.1}\text{Fe}_{2.9}\text{O}_4/\text{rGO}$ aerogel for Cu^{2+} and Ni^{2+} . *Journal of Solid State Chemistry*. 2025. Vol. 350. 125523. DOI: 10.1016/j.jssc.2025.125523
3. Khan A., Naeem A., Muhammad N., Hussain Sh., Jamil I., Shah I. A critical review of biosorption of manganese (Mn^{2+}) and nickel (Ni^{2+}) ions from aqueous solutions. *Desalination and Water Treatment*. 2023. Vol. 284. P. 151–158. DOI: 10.5004/dwt.2023.29284
4. Petranovska A. L., Abramov N. V., Turanska S. P., Gorbyk P. P., Kaminskiy A. N., Kussyak N. V. Adsorption of cis dichlorodiammineplatinum by nanostructures based on single-domain magnetite. *J. Nanostruct. Chem.* 2015. Vol. 5, No 3. P. 275–285. DOI: 10.1007/s40097-015-0159-9

5. Камінський О. М., Денисюк Р. О., Чайка М. В., Писаренко С. В., Панасюк Д. Ю. Сорбція йонних форм Цинку(II) з водних розчинів поверхнями магніточутливих наноккомпозитів, модифікованих гідроксипатитом. *Український журнал природничих наук*. 2023. № 5. С. 70–79. DOI: 10.32782/naturaljournal.5.2023.85
6. Shehata M. M., Waly S. A., Abdelaziz Y. A. Effect of Gd^{3+} doping on structural and optical properties of $MgO-MgAl_2O_4$ nanocomposites synthesized via co-precipitation method. *J Mater Sci: Mater Electron*. 2021. Vol. 32. P. 7423–7430. DOI: 10.1007/s10854-021-05455-y
7. Писаренко С. В., Камінський О. М., Денисюк Р. О., Євдоchenko О. С., Анічкіна О. В., Авдєєв С. В. Дослідження процесу адсорбції метиленового синього поверхнею калій титанату. *Український журнал природничих наук*. 2024. № 9. С. 123–132. DOI: 10.32782/naturaljournal.9.2024.12
8. Tripathy S., Raichur A. Abatement of fluoride from water using manganese dioxide-coated activated alumina. *Journal of Hazardous Materials*. 2008. Vol. 153, No 3. P. 1043–1051. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.100
9. Onyango M., Kojima Y., Aoyi O., Bernardo E., Matsuda H. Adsorption equilibrium modeling and solution chemistry dependence of fluoride removal from water by trivalent-cation-exchanged zeolite F-9. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004. Vol. 279, No 2. P. 341–350. DOI: 10.1016/j.jcis.2004.06.038
10. Baes Ch. F., Mesmer R. E. The hydrolysis of cations. *Wiley: New York*. 1976. 512 p.
11. Giles C. H., MacEwan T. H., Nakhwa S. N., Smith D. Studies in Adsorption: Part XI. A System of Classification of Solution Adsorption Isotherms and Its Use in Diagnosis of Adsorption Mechanisms and in Measurement of Specific Surface Area Solids. *Journal of the Chemical Society*. 1960. Vol. 14. P. 3973–3993. DOI: 10.1039/jr9600003973

References

1. Isaac, R., Siddiqui, Sh., Aldosari, O. F., Uddin, M. K. Magnetic biochar derived from *Juglans regia* for the adsorption of Cu^{2+} and Ni^{2+} : Characterization, modelling, optimization, and cost analysis. *Journal of Saudi Chemical Society*. 2023. Vol. 27, Is. 6. 101749. DOI: 10.1016/j.jscs.2023.101749
2. Qiao, Y., Zhang, S., Ou, N., Shen, L. Adsorption performance and mechanism of EDTA-modified $Cr_{0.1}Fe_{2.9}O_4/rGO$ aerogel for Cu^{2+} and Ni^{2+} . *Journal of Solid State Chemistry*. 2025. Vol. 350. 125523. DOI: 10.1016/j.jssc.2025.125523
3. Khan, A., Naeem, A., Muhammad, N., Hussain, Sh., Jamil, I., Shah, I. A critical review of biosorption of manganese (Mn^{2+}) and nickel (Ni^{2+}) ions from aqueous solutions. *Desalination and Water Treatment*. 2023. Vol. 284. P. 151–158. DOI: 10.5004/dwt.2023.29284
4. Petranovska, A. L., Abramov, N. V., Turanska, S. P., Gorbyk, P. P., Kaminskiy, A. N., Kussyak, N. V. Adsorption of cis dichlorodiammineplatinum by nanostructures based on single-domain magnetite. *J. Nanostruct. Chem*. 2015. Vol. 5, No 3. P. 275–285. DOI: 10.1007/s40097-015-0159-9
5. Kaminskyi, O. M., Denysiuk, R. O., Chaika, M. V., Pysarenko, S. V., Panasiuk, D. Yu. Sorbtsiia yonnykh form Tsynku(II) z vodnykh rozchyniv poverkhniamy mahnitochutlyvykh nanokompozytiv, modifykovanykh hidroksypatytyom [Sorption of ionic forms of Zinc (II) from aqueous solutions by surfaces of magneto-sensitive nanocomposites modified with hydroxyapatite]. *Ukrainskyi zhurnal pryrodnychyykh nauk*. 2023. № 5. S. 70–79. DOI: 10.32782/naturaljournal.5.2023.8. [in Ukrainian]
6. Shehata, M. M., Waly, S. A., Abdelaziz, Y. A. Effect of Gd^{3+} doping on structural and optical properties of $MgO-MgAl_2O_4$ nanocomposites synthesized via co-precipitation method. *J Mater Sci: Mater Electron*. 2021. Vol. 32. P. 7423–7430. DOI: 10.1007/s10854-021-05455-y
7. Pysarenko, S. V., Kamins'kyi, O. M., Denysyuk, R. O., Yevdochenko, O. S., Anichkina, O. V., Avdyeyev, S. V. Doslidzhennya protsesu adsorbtsiyi metylenovoho syn'oho poverkhneyu kaliy tytanatu [Study of the process of adsorption of methylene blue by the surface of potassium titanate]. *Ukrainskyi zhurnal pryrodnychyykh nauk*. 2024. № 9. S. 123–132. DOI: 10.32782/naturaljournal.9.2024.12 [in Ukrainian]
8. Tripathy, S., Raichur, A. Abatement of fluoride from water using manganese dioxide-coated activated alumina. *Journal of Hazardous Materials*. 2008. Vol. 153, No 3. P. 1043–1051. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.100
9. Onyango, M., Kojima, Y., Aoyi, O., Bernardo, E., Matsuda, H. Adsorption equilibrium modeling and solution chemistry dependence of fluoride removal from water by trivalent-cation-exchanged zeolite F-9. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004. Vol. 279, No 2. P. 341–350. DOI: 10.1016/j.jcis.2004.06.038
10. Baes, Ch. F., Mesmer, R. E. The hydrolysis of cations. *Wiley: New York*. 1976. 512 p.
11. Giles, C. H., MacEwan, T. H., Nakhwa, S. N., Smith, D. Studies in Adsorption: Part XI. A System of Classification of Solution Adsorption Isotherms and Its Use in Diagnosis of Adsorption Mechanisms and in Measurement of Specific Surface Area Solids. *Journal of the Chemical Society*. 1960. Vol. 14. P. 3973–3993. DOI: 10.1039/jr9600003973

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025