

А. П. Кусяк, С. П. Туранська, А. Л. Петрановська, П. П. Горбик

## Адсорбція катіонів $\text{Zn}^{2+}$ , $\text{Cd}^{2+}$ та $\text{Pb}^{2+}$

### нанокompозитами на основі однодоменного магнетиту

(Представлено академіком НАН України М. Т. Картелем)

*Синтезовано магніточутливі нанокompозити  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  і  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$  на основі однодоменного магнетиту. Виявлено залежність адсорбційних властивостей нанокompозитів від хімічної природи їх поверхні. Вивчено ізотерми та кінетику адсорбції катіонів  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  і їх суміші з водних розчинів в інтервалі рН 4,5–10,0. Нанокompозити характеризуються високою біосумісністю, ступінь вилучення іонів становить 95–99%. Найвищі адсорбційні параметри для всіх дослідних іонів мають наноструктури  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ . Зроблено висновок про перспективність синтезованих нанокompозитів для створення адсорбентів медико-біологічного, технічного і екологічного призначення.*

**Ключові слова:** магнетит, композити, модифікування, біосумісні покриття, адсорбція, катіони металів.

Використання однодоменного магнетиту як вихідного матеріалу для синтезу магніточутливих нанокompозитів обумовлено його унікальними фізико-хімічними та електрофізичними властивостями, прийнятними біосумісністю і біодеградабельністю, накопиченим досвідом у галузі модифікування поверхні, можливостями керування рухом наночастинок за допомогою зовнішнього магнітного поля, застосування на стадіях розділення та вилучення адсорбентів методу магнітної сепарації [1–3]. До особливостей однодоменного стану магнітних наночастинок належать однорідність намагнічення при будь-яких значеннях і напрямках магнітного поля, можливість існування доменів як у твердотільних феро- і феримагнітних сплавах і сполуках, так і в рідинах — суспензіях і колоїдах [4]. У багатьох практично важливих випадках функціональне застосування наночастинок (спрямований транспорт лікарських препаратів до органів і клітин-мішеней, розпізнавання і деконтамінація вірусів, адсорбція [5–9]) здійснюється в рідких середовищах.

В Інституті хімії поверхні ім. О. О. Чуйка НАН України розроблено технології синтезу однодоменного магнетиту [10], магніточутливих нанокompозитів широкого функціонального призначення з різною хімічною природою поверхні [1, 2, 5–9] та магнітних рідин [11, 12] на їх основі. Вказані наноматеріали використані при створенні нових типів консолідованих наноструктур, що ефективно взаємодіють з електромагнітними випромінюваннями заданого діапазону спектра [1], а також нової лікарської форми вітчизняного онкологічного препарату “Фероплат” [13], ідею якого вперше експериментально обґрунтовано [14] на засадах стратегії подолання резистентності злоякісних пухлин до цисплатину шляхом фармакологічної корекції обміну ендогенного заліза, що забезпечується застосуванням залізовмісного нанокompозита та цисплатину [15].

Як свідчать дані наукових джерел, катіони важких металів залишаються одними з найнебезпечніших токсичних забруднювачів, а проблема їх вилучення не втрачає актуальності і потребує подальших досліджень [6]. Тому метою дослідження було визначено синтез та

вивчення магніточутливих нанокompatитів медичного, екологічного та технічного використання для адсорбції іонів важких металів залежно від рН середовища та наявності суміші іонів.

**Експериментальна частина.** Високодисперсний магнетит синтезували за реакцією Елмора [1] за методикою [9]. Використовували фракцію частинок магнетиту розміром 6–23 нм, які є однодоменними [8]. Питома поверхня дослідних зразків становила 105 м<sup>2</sup>/г.

Для модифікування поверхні наночастинок магнетиту використовували покриття, здатні забезпечити біосумісність нанокompatитів із середовищем живого організму, зокрема тетраетоксисилан, *n*-бутилоортотитанат та ізопропілат алюмінію. Для дослідження адсорбційних характеристик поверхні нанокompatитів синтезовано такі зразки: Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Синтез нанокompatитів Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> здійснювали методом адсорбційного модифікування поверхні, а Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — методом хімічного модифікування поверхні магнетиту ізопропілатом алюмінію (C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>O)<sub>3</sub>Al.

Модифікування поверхні синтезованих зразків підтверджено методом інфрачервоної спектроскопії з фур'є-накопиченням (спектрометр “Perkin Elmer”, модель 1720X, діапазон 400–4000 см<sup>-1</sup>).

Адсорбцію (А, мг/г) та ступінь вилучення (R, %) на поверхні вихідного та модифікованого магнетиту щодо катіонів визначали шляхом вимірювання концентрацій іонів у розчинах до і після адсорбції із застосуванням атомно-абсорбційного методу (спектрофотометр С-115 М, полум'яна суміш ацетилен–повітря).

Для побудови ізотерм використовували розчини солей ZnCl<sub>2</sub>, CdCl<sub>2</sub>, Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> з концентраціями Zn<sup>2+</sup> 10–200 мг/л, Cd<sup>2+</sup> 2–250 мг/л та Pb<sup>2+</sup> 5–250 мг/л. Адсорбцію здійснювали в динамічному режимі при кімнатній температурі в ацетатно-аміачному буфері (*g* = 0,03 г, *V* = 5 мл).

Біосумісність магнетиту, нанокompatитів Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> оцінювали за їх впливом на життєздатність клітин хлібопекарських дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* [8]. Життєздатність клітин визначали за допомогою динамічної методики реєстрації CO<sub>2</sub>, виділеного в процесі анаеробного дихання (бродиння) після взаємодії клітин з синтезованими наноструктурами, а також цитохімічним методом. Використовували водні суспензії клітин та наноматеріалів (наважка дріжджів — 1 г, концентрація кожного наноматеріалу становила 28 мг/мл, час витримки — від 1 до 5 діб, температура ~25 °C). Цитотоксична дія магнетиту спостерігається при його граничній концентрації 0,01% (мас.): життєздатність клітин при цьому становила 98–99%. При більш високих концентраціях магнетиту (0,05% (мас.)) життєздатність дріжджів знижується до ~90%. Зменшення життєздатності клітин дріжджів за наявності нанокompatитів Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в умовах експерименту не зафіксовано.

Магнітні властивості синтезованих наноструктур визначались суперпарамагнетизмом однодоменного магнетиту — ядра нанокompatиту [8]. Наявність оболонкових структур SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> практично не впливала на магнітні властивості нанокompatита.

**Результати та обговорення.** Залежність адсорбції катіонів на поверхні синтезованих нанокompatитів від рН досліджували в динамічному режимі при кімнатній температурі в ацетатно-аміачному буфері. рН-потенціометричні вимірювання проводили на приладі І-160 М, результати подано на рис. 1.

Максимальні значення адсорбції Zn<sup>2+</sup> спостерігаються при рН 7,0–7,6, а для поверхні Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> діапазон рН розширений (7,0–9,0).

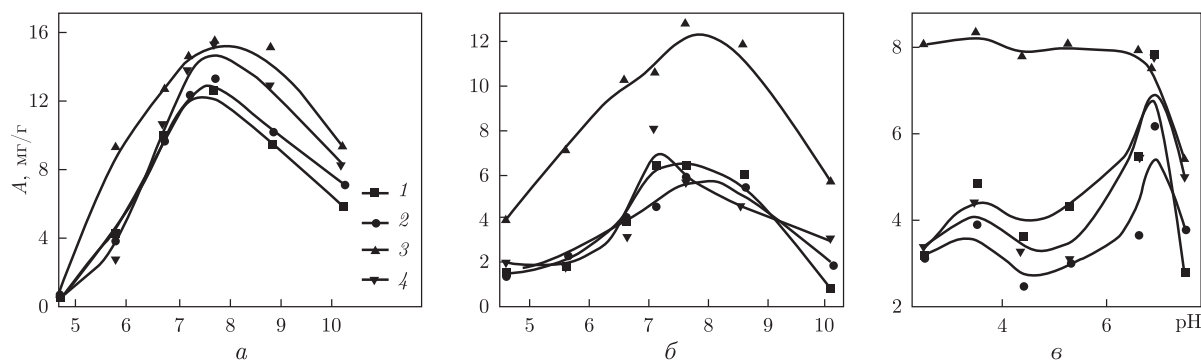


Рис. 1. Залежність адсорбції катіонів  $\text{Zn}^{2+}$  (а),  $\text{Cd}^{2+}$  (б) та  $\text{Pb}^{2+}$  (в) на поверхні синтезованих композитів від рН: 1 —  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ; 2 —  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ ; 3 —  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ ; 4 —  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$

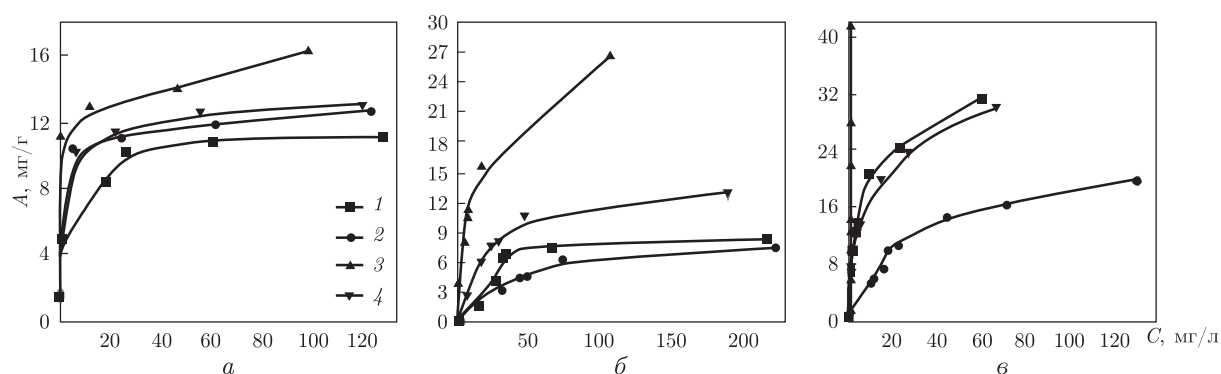


Рис. 2. Ізотерми адсорбції катіонів  $\text{Zn}^{2+}$ , рН 7,4 (а),  $\text{Cd}^{2+}$ , рН 7,54 (б) та  $\text{Pb}^{2+}$ , рН 7,0 (в) на поверхні композитів: 1 —  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ; 2 —  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ ; 3 —  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ ; 4 —  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$

Для всіх поверхонь максимальна адсорбція іонів  $\text{Cd}^{2+}$  відмічається при рН 7,0–8,5. При зсуві рН в кислу або лужну сторону адсорбційна ємність зменшується. Поверхня композита  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  відрізняється значною перевагою адсорбції щодо катіонів  $\text{Cd}^{2+}$ .

Максимальна адсорбція іонів  $\text{Pb}^{2+}$  для всіх поверхонь спостерігається при рН 7,1. Для поверхні  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  характерні високі показники адсорбційної ємності при широкому діапазоні рН. Характерне збільшення адсорбційної ємності в діапазоні рН 3–4, властиве для адсорбції іонів свинцю. Підвищення рН вище 7,5 призводить до утворення  $\text{Pb}(\text{OH})_2$ , який існує в розчині у вигляді колоїду. Тому дослідження адсорбції іонів  $\text{Pb}^{2+}$  в діапазоні рН вище 7,5–8,0 було не доцільним.

Кінетичні дослідження свідчать про те, що істотна зміна швидкості насичення поверхні щодо катіонів  $\text{Zn}^{2+}$  спостерігається на композитах  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ . Максимум ємності на модифікованих поверхнях досягається вже в перші 15 хв, тоді як насичення немодифікованого магнетиту досягається за 90–120 хв. Щодо катіонів  $\text{Cd}^{2+}$ , адсорбція на поверхнях  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$  та  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  відбувається тривалий час, поверхня  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  виходить на насичення в інтервалі 90–120 хв.

Максимуми адсорбції катіонів  $\text{Pb}^{2+}$  досягаються за 15 хв, крім поверхонь композитів, модифікованих ТЕОС.

Ізотерми адсорбції досліджуваних іонів наведено на рис. 2.

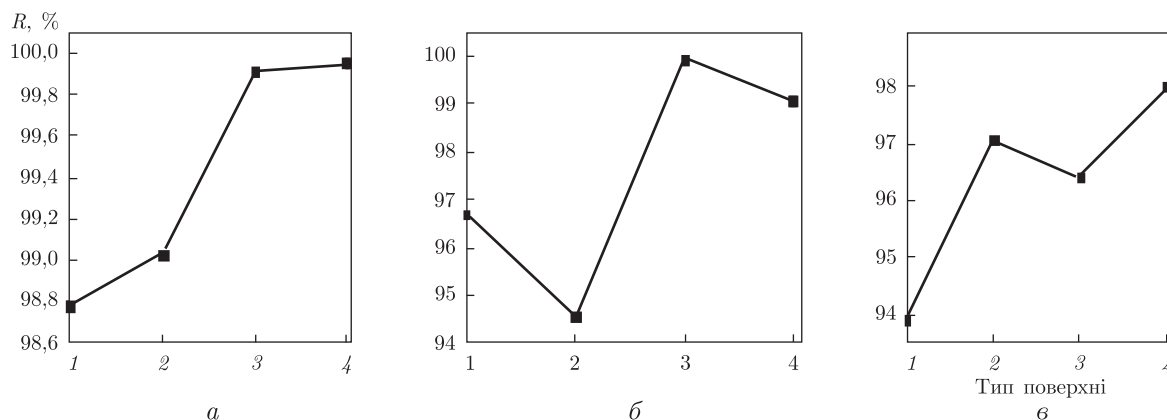


Рис. 3. Залежність ступеня вилучення ( $R$ ) катіонів  $\text{Zn}^{2+}$  (а),  $\text{Cd}^{2+}$  (б) та  $\text{Pb}^{2+}$  (в) від хімічної природи поверхні композита: 1 —  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ; 2 —  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ ; 3 —  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ ; 4 —  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$

Аналіз ізотерм адсорбції катіонів  $\text{Zn}^{2+}$  на поверхні усіх композитів (див. рис. 2, а) показує, що зростання рівноважної концентрації іонів  $\text{Zn}^{2+}$  призводить до адсорбційного насичення поверхні адсорбентів. Така форма ізотерм може бути описана рівнянням Ленгмюра, яке справедливе для адсорбентів з енергетично еквівалентними адсорбційними центрами.

Модифікування поверхні збільшує адсорбційну ємність (див. рис. 2, а, криві 2, 3, 4). У нанокompозитів  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  спостерігається  $A_{\max} = 16,3$  мг/г без виходу на насичення в межах дослідних концентрацій. Також високі показники має поверхня композита  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $A_{\max} = 13,0$  мг/г з виходом на насичення (див. рис. 2, а, крива 4).

На ізотермах адсорбції катіонів  $\text{Cd}^{2+}$  спостерігається аналогічна тенденція. Найвищі показники адсорбційної ємності відзначаються на поверхні композита  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ ,  $A_{\max} = 26,5$  мг/г без виходу на насичення в межах дослідних концентрацій (див. рис. 2, б).

Ізотерми іонів  $\text{Pb}^{2+}$ , в умовах дослідних концентрацій, свідчать про високі адсорбційні властивості немодифікованого магнетиту та поверхні нанокompозита  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  (див. рис. 2, в, крива 1, 3).

Високі адсорбційні показники поверхні  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  щодо всіх дослідних катіонів можна пов'язати з гідрофобними властивостями покриття. Подібні ізотерми відрізняються високою спорідненістю адсорбату до поверхні адсорбенту, спостерігаються при значній енергії адсорбції та в області низьких концентрацій можуть перетинатися з віссю ординат.

З кривих ізотерм були обчислені значення адсорбції ( $A$ , мг/г) (за катіонами  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ) та ступінь вилучення ( $R$ , %) наноструктур з різною хімічною природою поверхні.

Розрахунки ступеня вилучення показали залежність природи поверхні від катіонів та концентрації розчинів. У межах концентрацій до 75 мг/л високий відсоток вилучення катіонів  $\text{Zn}^{2+}$  (95–99%) показують усі модифіковані поверхні, вилучення іонів  $\text{Cd}^{2+}$  з таким відсотком виявляє тільки поверхня композита  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ . Відсоток вилучення іонів  $\text{Pb}^{2+}$  дуже високий на всіх поверхнях, навіть при високих концентраціях.

Результати дослідження підтверджують вплив поверхні композита на адсорбцію іонів металів, але найвищі показники належать адсорбенту  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ .

Вивчення десорбції катіонів з поверхні нанокompозитів у дистильовану воду показало, що вивільнення катіонів  $\text{Zn}^{2+}$  проходить повільно за тривалий час, з поверхні  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2 \sim 30\%$  протягом 3 год, десорбція іонів  $\text{Cd}^{2+}$  практично не відбувається протягом години і іони  $\text{Pb}^{2+}$  зовсім не десорбуються.

Адсорбційну активність поверхні кожного синтезованого композита вивчали із розчину солей при одночасному вмісті іонів  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ .

Адсорбцію кожного катіона на поверхні композитів досліджували при концентраціях, що відповідають максимальному ступеню вилучення і максимальному показнику адсорбції.

На рис. 3 показано залежність ступеня вилучення від хімічної природи поверхні композитів, але у всіх випадках  $R$  знаходиться в межах 95–99%.

Дослідження процесів адсорбції показало, що синтезовані адсорбенти мають високий ступінь вилучення іонів важких металів (до 99%) при одиничному та сумісному знаходженні в розчинах у межах концентрацій до 75 мг/л за умовами експерименту ( $g = 0,05$  г,  $V = 5$  мл). Конкуруючий вплив домішаних іонів знижує  $R$  до 94% на окремих поверхнях.

Результати досліджень підтверджують вплив поверхні магніточутливих наноконкомпозитів на адсорбцію іонів важких металів. Найвищі показники вилучення іонів за наявності конкуруючих домішок має поверхня наноконкомпозита  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ .

Одержані результати можуть бути використані в розробках адсорбентів медико-біологічного, технічного і екологічного призначення, зокрема для вилучення катіонів  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ .

Таким чином, синтезовано магніточутливі наноконкомпозити  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  і  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$  на основі однодоменного магнетиту. Досліджено адсорбцію на поверхнях наноконкомпозитів іонів  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  та їх суміші з водних розчинів в інтервалі рН 4,5–10,0. Наноконкомпозити характеризуються високою біосумісністю, ступінь вилучення іонів важких металів становить 95–99%. Найвищі адсорбційні параметри для всіх дослідних іонів мають наноструктури  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ . Експериментальні результати свідчать про те, що синтезовані наноконкомпозити можуть бути перспективними для створення адсорбентів медико-біологічного, технічного і екологічного призначення.

## Цитована література

1. *Наноматериалы и наноконкомпозиты в медицине, биологии, экологии* / Под ред. А. П. Шпака, В. Ф. Чехуна. – Киев: Наук. думка, 2011. – 443 с.
2. Горбик П. П., Горобец С. В., Турелик М. П., Чехун В. Ф., Шпак А. П. Биофункционализация наноматериалов и наноконкомпозитов. – Киев: Наук. думка, 2011. – 283 с.
3. Міщенко В. М., Картель М. Т., Луценко В. А., Ніколайчук А. Д., Кусяк Н. В., Кордубан О. М., Горбик П. П. Магніточутливі адсорбенти на основі активованого вугілля: синтез та властивості // Поверхность. – 2010. – Вып. 2 (17). – С. 276–285.
4. *Nanomaterials and Supramolecular Structures: Physics Chemistry, and Applications* / Eds. A. P. Shpak, P. P. Gorbyk. – Dordrecht: Springer, 2009. – 420 p.
5. Gorbyk P. P., Chekhun V. F. Nanocomposites of medicobiologic destination: reality and perspectives for oncology // Functional materials. – 2012. – 19, No 2. – P. 145–156.
6. Туранская С. П., Каминский А. Н., Кусяк Н. В., Туров В. В., Горбик П. П. Синтез, свойства и применение магнитоуправляемых адсорбентов // Поверхность. – 2012. – Вып. 4(19). – С. 266–292.
7. Gorbyk P. P., Lerman L. B., Petranovska A. L., Turanska S. P. Magnetosensitive Nanocomposites with Functions of Medico-Biological Nanorobots: Synthesis and Properties // Advances in Semiconductor Research: Physics of Nanosystems, Spintronics and Technological Applications. – New York: Nova Science Publishers, 2014. – P. 161–198.
8. Petranovska A. L., Abramov N. V., Turanska S. P., Gorbyk P. P., Kaminskiy A. N., Kusyak N. V. Adsorption of *cis*-dichlorodiammineplatinum by nanostructures based on single-domain magnetite // J. Nanostruct. Chem. – 2015. – 5. – P. 275–285. – DOI 10.1007/s40097-015-0159-9.
9. Горбик П. П., Абрамов М. В., Петрановська А. Л., Турелик М. П., Васильева О. А. Тимчасовий технологічний регламент на виробництво речовини “Магнетит У”: Свідectvo про реєстрацію авторського права № 46056, ТТР 03291669.012:2012; Зареєстровано в державній службі інтелектуальної власності України 17.10.2012.

10. Горбик П. П., Абрамов М. В., Петрановська А. Л., Пилипчук Є. В., Васильєва О. А. Тимчасовий технологічний регламент на виробництво магнітної рідини: Свідчення про реєстрацію авторського права № 58159, ТТР 03291669.017:2014; Зареєстровано в державній службі інтелектуальної власності України 20.01.2015.
11. Патон Б. Є., Горбик П. П., Петрановська А. Л., Турелик М. П., Абрамов М. В., Васильєва О. А., Чехун В. Ф., Лук'янова Н. Ю. Магнітна протипухлинна рідина: Пат. 78473 Україна. – Заявл. 16.07.2012; Опубл. 25.03.2013, Бюл. № 6.
12. Горбик П. П., Петрановська А. Л., Турелик М. П., Абрамов М. В., Васильєва О. А. Магнітна рідина: Пат. 78448 Україна. – Заявл. 21.06.2012; Опубл. 25.03.2013, Бюл. № 6.
13. Чехун В. Ф. <http://www.nas.gov.ua/text/pdfDocumentsMeetingPresidiumNASU/150429.pdf>.
14. Лук'янова Н. Ю. Експериментальне обґрунтування ефективності використання феромагнітного на-нокомпозиту у подоланні резистентності пухлинних клітин до цисплатину: Дис. ... д-ра біол. наук / Інститут експериментальної патології, онкології і радіобіології ім. Р.Є. Кавецького НАН України; 14.01.07 – онкологія. – Київ, 2015. – 43 с.
15. Чехун В. Ф., Лук'янова Н. Ю., Тодор І. М., Налескіна Л. А., Демарш Д. В., Лозовська Ю. В., Горбик П. П., Петрановська А. Л. Спосіб підвищення протипухлинної активності цисплатину: Пат. на корисну модель 80767 Україна. – Заявл. 20.12.2012; Опубл. 10.06.2013, Бюл. № 11.

## References

1. *Nanomaterials and nanocomposites in medicine, biology, ecology*. Eds. A. P. Shpak, V. F. Chekhun, Kiev: Nauk. Dumka, 2011 (in Russian).
2. *Gorbyk P. P., Gorobets S. V., Turelyk M. P., Chehun V. F., Shpak A. P. Biofunktionalizatsiya nanomaterials and nanocomposites*, Kiev Naukova Dumka, 2011 (in Russian).
3. *Mishchenko V. N., Cartel N. T., Lutsenko V. A., Nikolaichuk A. D., Kussyak N. V., Korduban A. M., Gorbyk P. P. Surface*, 2010, Iss. 2(17): 276–285 (in Ukrainian).
4. *Shpak A. P., Gorbyk P. P., eds. Nanomaterials and Supramolecular Structures: Physics Chemistry, and Applications*, Dordrecht: Springer, 2009.
5. *Gorbyk P. P., Chekhun V. F. Functional materials*, 2012, **19**, No 2: 145–156.
6. *Turanska S. P., Kaminsky A. N., Kussyak N. V., Turov V. V., Gorbyk P. P. Surface*, 2012, Iss. 4(19): 266–292 (in Russian).
7. *Gorbyk P. P., Lerman L. B., Petranovska A. L., Turanska S. P. Advances in Semiconductor Research: Physics of Nanosystems, Spintronics and Technological Applications*, Ch. 9, New York: Nova Science Publishers, 2014: 161–198.
8. *Petranovska A. L., Abramov N. V., Turanska S. P., Gorbyk P. P., Kaminskiy A. N., Kussyak N. V. J. Nanostruct. Chem.*, 2015, **5**: 275–285, DOI 10.1007/s40097-015-0159-9.
9. *Gorbyk P. P., Abramov N. V., Petranovska A. L., Turelyk M. P., Vasilieva O. A. Provisional Regulations on the production of technological material “Magnetite U”, the certificate of copyright registration number 46056, TTP 03291669,012:2012; Registered with the State Intellectual Property of Ukraine 17.10.2012 (in Ukrainian).*
10. *Gorbyk P. P., Abramov M. V., Petranovska A. L., Pilipchuk E. V., Vasilieva O. A. Provisional Regulations on the production technology of magnetic fluid, The certificate of copyright registration number 58159, TTP 03291669,017:2014; Registered with the State Intellectual Property of Ukraine 01.20.2015 (in Ukrainian).*
11. *Paton B. E., Gorbyk P. P., Petranovska A. L., Turelyk M. P., Abramov M. V., Vasilieva O. A., Chekhun V. F., Lukyanova N. Yu. Antitumor magnetic fluid*, Pat. 78473 Ukraine, Publ. 25.03.2013, Bull. No 6 (in Ukrainian).
12. *Gorbyk P. P., Petranovska A. L., Turelyk M. P., Abramov M. V., Vasilieva O. A. Magnetic fluid*, Pat. 78448 Ukraine, Publ. 25.03.2015, Bull. No 6 (in Ukrainian).
13. *Chekhun V. F.* <http://www.nas.gov.ua/text/pdfDocumentsMeetingPresidiumNASU/150429.pdf>
14. *Lukyanova N. Yu. Experimental study efficiency of ferromagnetic nanocomposites in overcoming the resistance of tumor cells to cisplatin*, Dis. ... Doctor. biol. sci., R.E. Kavetsky Institute of Experimental Pathology, Oncology and Radiobiology of the NAS of Ukraine, 14.01.07, Oncology, Kiev, 2015 (in Ukrainian).

15. Chekhun V. F., Lukyanov N. Yu., Todor I. M., Nalyeskina L. A., Demarche D. V., Lozovskaja J. V., Gorbyk P. P., Petranovska A. L. Method of improving the antitumor activity of cisplatin: Pat. for utility model 80767 Ukraine, Publ. 10.06.2013, Bull. No 11 (in Ukrainian).

Інститут хімії поверхні ім. О. О. Чуйка  
НАН України, Київ

Надійшло до редакції 14.07.2015

А. П. Кусяк, С. П. Туранская, А. Л. Петрановская, П. П. Горбик

### Адсорбция катионов $Zn^{2+}$ , $Cd^{2+}$ и $Pb^{2+}$ нанокompозитами на основе однодоменного магнетита

Інститут хімії поверхні ім. А. А. Чуйко НАН України, Київ

*Синтезированы магниточувствительные нанокompозиты  $Fe_3O_4/SiO_2$ ,  $Fe_3O_4/TiO_2$  и  $Fe_3O_4/Al_2O_3$  на основе однодоменного магнетита. Показана зависимость адсорбционных свойств нанокompозитов от химической природы их поверхности. Изучены изотермы и кинетика адсорбции катионов  $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$  и их смеси синтезированных нанокompозитов из водных растворов в интервале pH 4,5–10,0. Нанокompозиты характеризуются высокой биосовместимостью, степень извлечения ионов составляет 95–99%. Лучшими адсорбционными параметрами для всех исследуемых ионов обладают наноструктуры  $Fe_3O_4/TiO_2$ . Сделан вывод о перспективности синтезированных нанокompозитов для создания адсорбентов медико-биологического, технического и экологического назначения.*

**Ключевые слова:** магнетит, композиты, модифицирование, биосовместимые покрытия, адсорбция, катионы металлов.

A. P. Kusyak, S. P. Turanska, A. L. Petranovska, P. P. Gorbyk

### Adsorption of $Zn^{2+}$ , $Cd^{2+}$ , and $Pb^{2+}$ cations by nanocomposites based on single-domain magnetite

Chuiko Institute of Surface Chemistry of the NAS of Ukraine, Kiev

*Magnetosensitive nanocomposites  $Fe_3O_4/SiO_2$ ,  $Fe_3O_4/TiO_2$ ,  $Fe_3O_4/Al_2O_3$  based on single-domain magnetite are synthesized. The dependence of adsorption properties of nanocomposites on the chemical nature of their surface is revealed. The isotherms and the kinetics of adsorption of  $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ , and  $Pb^{2+}$  cations and their mixtures from aqueous solutions are studied in a pH interval of 4.5–10.0. The nanocomposites had high biocompatibility, the extraction extent of the ions was 95–99%. The highest adsorption parameters for all the studied ions are demonstrated for  $Fe_3O_4/TiO_2$  nanostructures. The conclusion is drawn on prospects of the synthesized nanocomposites for the creation of adsorbents for medico-biological, technical, and ecological destinations.*

**Keywords:** magnetite, magnetosensitive nanocomposites, surface modification, biocompatible coatings, adsorption, metal cations.