

PACS numbers: 61.05.cp, 75.50.Tt, 75.75.Cd, 78.67.Sc, 81.16.-c, 82.37.Rs, 87.64.Cc

## Синтеза та властивості магнеточутливих нанокompозитів магнетит/діоксид кремнію з метою створення імуносорбентів

Л. С. Семко, Л. П. Сторожук, П. П. Горбик, М. В. Абрамов,  
О. І. Оранська

*Інститут хімії поверхні ім. О. О. Чуйка НАН України,  
вул. Генерала Наумова, 17,  
03164 Київ, Україна*

Розроблено методику модифікування поверхні магнетиту оксидом кремнію. Як модифікатор використовували силікат натрію. Методами рентгеноструктурної аналізи, ІЧ-спектроскопії з Фур'є-нагромадженням досліджено особливості структури одержаних нанокompозитів. За допомогою вібраційного магнетометра визначено їх магнетні характеристики. На основі нанокompозитів  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  одержано імуносорбенти з іммобілізованим на їх поверхні імуноглобуліном людини. Досліджено фізичну адсорбцію нормального імуноглобуліну людини на одержаних нанокompозитах за допомогою спектрофотометричної методи.

The technique for obtaining of the magnetite-based nanocomposites modified by silica is worked out. Sodium silicate is used as a modifying agent. The structure of obtained composites is investigated by methods of X-ray analysis and IR–Fourier spectroscopy. The magnetic properties of these nanocomposites are investigated with the use of a vibration magnetometer. Using the  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  nanocomposites as a base, models of immunoabsorbents containing immobilized human immunoglobulin are prepared. Physical adsorption of normal human immunoglobulin on the synthesized  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  nanocomposites is studied with spectrophotometric method.

Разработано методику модифицирования поверхности магнетита оксидом кремния с использованием силиката натрия как модификатора. Методами рентгеноструктурного анализа, ИК-спектроскопии с Фурье-накоплением исследованы особенности структуры полученных нанокompозитов. С помощью вибрационного магнетометра определены их магнитные характеристики. На основе нанокompозитов  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  получены иммуносорбенты с иммобилизованным иммуноглобулином человека. Исследована физическая адсорбция нормального иммуноглобулина на полученных нанокompозитах с помощью спектрофотометрического метода.

**Ключові слова:** магнеточутливі наноккомпозити, магнетит/діоксид кремнію, імуносорбенти.

*(Отримано 30 жовтня 2009 р.)*

## 1. ВСТУП

Магнетні матеріали широко застосовуються в різних галузях науки і техніки (радіотехніці, електроніці, мікроелектроніці, спінтроніці, виготовленні лазерів, каталізі), а останнім часом у медицині, фармакології та біології [1]. Окрім того, магнетне поле можна використати для розділення біологічних об'єктів (живих клітин, біомолекул, бактерій, вірусів) [2]. Особливий інтерес дослідників викликає розроблення нових магнетних імуносорбентів. Такі препарати можуть бути застосовані для очищення крові від вірусів, онкології, імунології, імуноаналізи тощо [3–6]. Поліфункціональні властивості вищезазначених матеріалів забезпечуються структурними особливостями їх частинок, ієрархічною будовою. Наявність магнетного ядра (заліза, магнетиту, ніклю та ін.) забезпечує магнетні властивості, дозволяє керувати рухом частинок у магнетному полі, доставляти частинки в певне місце живого організму, утримувати їх, дає змогу підвищити концентрацію лікарського препарату в заданому місці, знизити токсичну дію ліків на весь організм [7–9].

Немагнетна оболонка на поверхні магнетного ядра (із полімерів, оксиду кремнію, титану) зумовлює біосумісність і адсорбційну здатність матеріалу до приєднання біологічних об'єктів (наприклад: клітин, антитіл). В свою чергу, шар антитіл забезпечує приєднання вірусів до частинок імуносорбенту або розпізнає осередок захворювання в живому організмі.

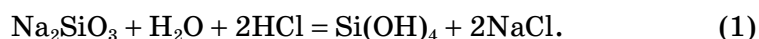
Магнетні адсорбенти описані в [7–10]. Найбільш поширеними шаруватими наноккомпозитами для магнетних адсорбентів є матеріал магнетит/оксид кремнію.

Для одержання поверхневого шару наноккомпозитів типу  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  можуть бути використані силікати лужних металів [10, 11] або алкоксиди кремнію [12]. Раніше нами було одержано серію наноккомпозитів на основі магнетиту, модифікованого діоксидом кремнію та досліджені їх структура та властивості [9, 13]. Як прекурсор  $\text{SiO}_2$  нами використано тетраетоксисилан (ТЕОС). Встановлено, що мінімальна товщина шару, що перешкоджає окисненню частинок магнетиту, забезпечується модифікуванням 0,15–0,18 г  $\text{SiO}_2$  на 1 г поверхні магнетиту, 1,5–1,8 мг на 1 м<sup>2</sup> магнетиту. Показано, що таке покриття  $\text{SiO}_2$  на поверхні магнетиту підвищує термічну стабільність наноккомпозитів у порівнянні з немодифікованим магнетитом.

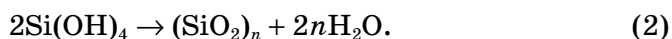
Проте для розроблення сучасної технології одержання наноккомпозитів магнетит/оксид кремнію потрібно оцінити раціональність за-

стосування різних прекурсорів, обрати найкращі з них для одержання шару  $\text{SiO}_2$  на поверхні магнетиту, оптимальні умови синтези, спростити процеси синтези, тобто вдосконалити технологічний режим та покращити характеристики цих наноконкомпозитів. Одним з важливих факторів при розробленні нанотехнологій є вартість компонент застосованих композитів, тому як прекурсор  $\text{SiO}_2$  для створення шаруватого наноконкомпозита  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  ми обрали дешевий продукт — силікат натрію.

Застосування силікату натрію для створення силікагелів широко відомо [10, 11, 14]. Кремнійова кислота може бути одержана додаванням кислот до розведеного рідкого скла, аналогічно тому, як описано в [12, 14]:



Далі кремнійові кислоти конденсуються до полікремнійових кислот:



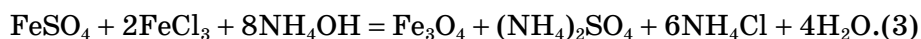
Не дивлячись на те, що основні стадії одержання  $\text{SiO}_2$  відомі, проте для створення сучасних магнетних адсорбентів потрібні деякі нові технологічні рішення. Насамперед, потрібно в процесі синтезу наноконкомпозита запобігати окисненню магнетиту, тому що утворення немагнетних фаз призводить до зменшення або втрати питомої магнетованости. Крім того, порошки магнетного адсорбенту повинні мати термічну стійкість у разі їх багаторазового застосування, а також стійкість до розшаровування у воді та використанні магнетних полів. В зв'язку з цим нами розроблена нова методика для одержання наноконкомпозитів типу  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ .

Мета роботи — синтез та дослідження властивостей наноконкомпозитів  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  з використанням силікату натрію як прекурсором  $\text{SiO}_2$ .

## 2. МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Одержання вищезазначених наноконкомпозитів включає стадії синтезу магнетиту та безпосередньо шаруватих наноконкомпозитів.

Синтез магнетиту детально описана нами в [7–9]. Для його одержання використовували реакцію швидкої нейтралізації надлишком водного розчину ам'яку суміші солей дво- і тривалентного заліза:



Магнетний шаруватий матеріал одержували наступним чином. Спочатку брали порошок магнетиту в сухому вигляді або у вигляді суспензії. Далі до вологих магнетних частинок додавали дистильо-

вану воду і диспергували в ультразвуковому диспергаторі УЗДН-2 протягом 5 хв. Магнетит брали у розрахунку одержання суспензії магнетиту з вмістом твердої фази 7–8 мас.%. Суспензію нагрівали до 80–90°C при перемішуванні в ультразвуковому диспергаторі. Потім до неї поступово додавали силікат натрію (10,7 мас.% SiO<sub>2</sub> і 3,4 мас.% Na<sub>2</sub>O) і інтенсивно перемішували в ультразвуковому диспергаторі протягом 10–15 хвилин. Далі помірно змішували у змішувачі із нагріванням при температурі 90°C і додавали по краплям 1н HCl до досягнення рН = 7,5. Суспензію залишали стояти при 90°C, при цьому помірно перемішували 20–30 хвилин. Далі виконували осадження твердих частинок у постійному магнетному полі. Після осадження виконували декантацію осаду з наступним промиванням дейнізованою водою. Промивання з декантацією здійснювали 7–8 разів. Після цього виконували сушіння одержаного порошку при температурі 108–110°C до постійної маси. Кількість SiO<sub>2</sub> у поверхневому шарі варіювали від 0,10 до 1,2 г на 1 г магнетиту за рахунок зміни кількості силікату натрію при додаванні до суспензії магнетиту. Далі виконували попереднє вакуумування у вакуумній установі ВУП-5 в інтервалі температур 20–110°C протягом 10–100 хв. при тиску 1,3–13 Па. Після цього порошок нанокompозита розташовували в кварцовому реакторі, реактор заповнювали аргоном і нагрівали до температури 450°C 2 год.

Запропоноване термооброблення необхідне для здійснення процесів полімеризації кремнієвих кислот, видалення побічних продуктів синтезу, а також для наступного процесу руйнування покриття полімеру до (SiO<sub>2</sub>)<sub>n</sub>, де  $n < 7$  [15]. Застосування атмосфери аргону за умови термооброблення запобігає окисненню магнетиту при  $T > 400^\circ\text{C}$ .

Для визначення характеристик магнетиту та нанокompозитів на його основі застосовували наступні методики. Питому поверхню вихідного Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> та зразків Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> визначали за адсорбцією азоту (методом БЭТ) на установі 'Kelvin-1042' (Costech International Instruments). Для ідентифікації магнетиту в нанокompозиті застосовували метод рентгенофазової аналізи (РФА). РФА проводили за допомогою дифрактометра (ДРОН-4-07) у випроміненні кобальтової аноди ( $\lambda = 1,79021 \text{ \AA}$ ) з залізним фільтром у відбитих променях і геометрією зйомки за Бреґгом–Брентано. При цьому вводили такі позначення:  $I$  — інтенсивність,  $\text{с}^{-1}$ ;  $2\theta$  — значення кута відбитого променя, кутових градусів. Для визначення наявності шару SiO<sub>2</sub> в нанокompозиті застосовували ІЧ-Фур'є-спектроскопію. Дослідження нанокompозитів проводили на ІЧ-Фур'є спектрометрі NEXUS виробництва Thermo Nicolet (США) в діапазоні 600–4000  $\text{см}^{-1}$ .

Для дослідження магнетних властивостей порошоків магнетиту і нанокompозитів на його основі використовували вібраційний магнетометер. Частота і амплітуда вібрації зразка задавалися генератором

коливань і підсилювачем низької частоти. Вимірювання виконано на частоті 228 Гц при кімнатній температурі. Зразками для досліджень слугували сухі знемагнетовані порошки. Методика вимірів описана в [8, 9]. На основі експериментальних результатів будували циклічні залежності значень магнетованості насичення ( $\sigma_s$ ) від напруженості магнетного поля ( $H_c$ ) — петлі гістерези. Використовуючи ці залежності, визначали наступні магнетні характеристики порошків магнетиту та наноккомпозитів: індукцію та магнетованість насичення ( $B_s$  та  $M_s$ , відповідно), залишкову магнетованість ( $M_r$ ) та коерцитивну силу по індукції ( $H_c$ ). Значення питомої магнетованості досліджуваних зразків знаходили за формулою  $\sigma_i = (\sigma_{ет} m_{ет} / u_{ет})(u_i / m_i)$ , де  $\sigma$  — питома магнетованість,  $m$  — маса,  $u$  — ЕРС; індексами «ет» і «i» позначені відповідні значення еталонного і досліджуваного зразків. Як еталонний зразок використовували  $Fe_3O_4$  (98%), виробництва фірми 'Nanostructured&Amorphous Materials Inc.', USA, питома магнетованість насичення при кімнатній температурі якого становить  $\sim 8,25$  мкТл·м<sup>3</sup>/кг.

Тестування адсорбційної здатності одержаних зразків та оцінку принципової можливості утворення імуносорбентів  $Fe_3O_4/SiO_2$ /імуноглобулін виконували з використанням розчину комерційного нормального імуноглобуліну людини (Ig). Останній був очищений від стабілізатора (гліцину) шляхом діалізи проти фізіологічного розчину на протязі 24 годин за  $T = 4^\circ C$ . Вихідна концентрація Ig дорівнювала 86,37 мг/мл. Визначення адсорбційної здатності наноккомпозитів  $Fe_3O_4/SiO_2$  виконували на зразках з вмістом  $SiO_2$  у поверхневому шарі від 0,1 до 0,3 г на 1 г магнетиту.

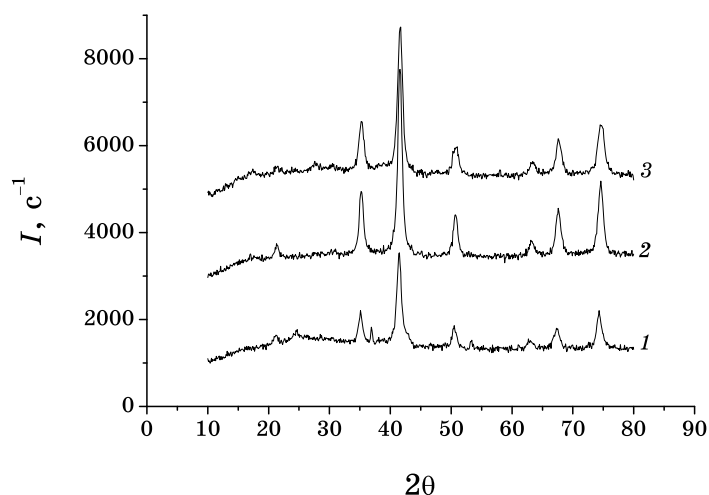
Для здійснення фізичної адсорбції імуноглобуліну на даний наноккомпозит готували наступний склад. Наважка адсорбентів складала 100 мг. До неї додавали буферний розчин (3мл ( $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ ), 142 мл води,) до pH = 9,0 дейонізовану воду та відповідну кількість імуноглобуліну.(зразок  $Fe_3O_4/0,1 SiO_2$ ) і 6 мг імуноглобуліну і 129 мкл води (зразок  $Fe_3O_4/0,3 SiO_2$ ).

Для визначення кількості адсорбованого імуноглобуліну розчин з осадом функціоналізованого наноккомпозита витримували протягом 30 хв. та 2 години, а потім перевіряли кількість адсорбованого імуноглобуліну на спектрофотометрі Lambda-35 (Perkin-Elmer USA) при вбиранні 280 нм. На основі одержаних даних будували графік залежності кількості сорбованого імуноглобуліну на поверхні 100 мг наноккомпозита ( $v$ , мг) від вмісту  $SiO_2$  в поверхневому шарі 1 г  $Fe_3O_4$  ( $g$ , г).

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Одержані дані наведено на рис. 1–4.

З аналізу дифрактограм (рис. 1) зразків наноккомпозитів  $Fe_3O_4/SiO_2$

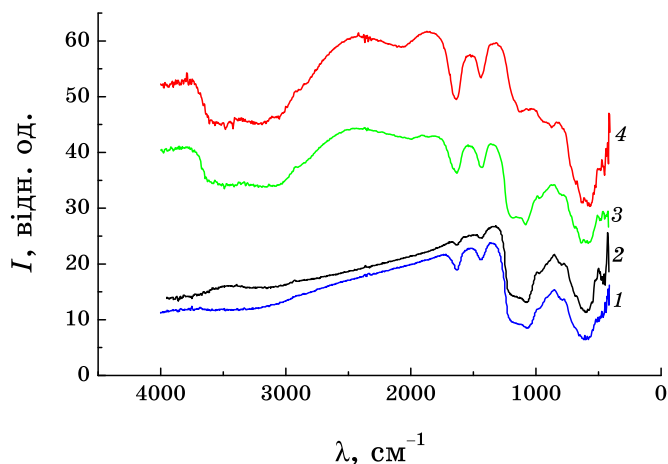


**Рис. 1.** Дифрактограми зразків наноконкомпозитів  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ , одержаних після термооброблення при  $450^\circ\text{C}$ . Вміст  $\text{SiO}_2$  (г) у поверхневих шарах наноконкомпозитів у розрахунку на 1 г магнетиту: 1 — (0,1); 2 — (0,3); 3 — (0,68).

можна зробити висновок про індикацію фази  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  в наноконкомпозитах. Було визначено, що вихідний магнетит має питому поверхню  $100 \text{ м}^2/\text{г}$ . На основі даних рентгенофазової аналізи за допомогою Шеррерового рівняння [16, 17] розраховано значення середнього розміру кристалітів  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , яке дорівнює  $12 \text{ нм}$ . Питома поверхня композитів з вмістом 0,15, 0,2 та 0,3 г  $\text{SiO}_2$  на 1 г магнетиту по відношенню до вихідного магнетиту значно зростає і дорівнює, відповідно, 105, 126,  $164 \text{ м}^2/\text{г}$ .

Наявність  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  в композитах було підтверджено даними дифракції Рентгенового випромінення за присутністю на дифрактограмах (рис. 1) рефлексів при кутах відбиття  $2\theta = 21,5^\circ, 35^\circ, 41,5^\circ, 50,5^\circ, 63,4^\circ, 67,5^\circ, 74^\circ$ , з міжплощинним віддаленням 4,8, 2,95, 2,52, 2,9, 1,7, 1,6,  $1,48 \text{ \AA}$ , що відповідають кристалічній фазі магнетиту  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (JCPDS № 19-629). Однак рефлексів, характерних для кристалічної ґратки діоксиду кремнію, виявлено не було. Про присутність покриття в наноконкомпозитах свідчить зменшення інтенсивності рефлексів  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  на дифрактограмах досліджуваних зразків модифікованого магнетиту. Найбільш помітно воно для зразка з найбільшим вмістом  $\text{SiO}_2$  (рис. 1, диф. 3).

За умови мінімального вмісту модифікатора (рис. 1, диф. 3) на дифрактограмі присутній слабкий пік при  $2\theta = 38,5^\circ$ , який відповідає найбільш інтенсивному рефлексу кристалічної ґратки  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  (JCPDS №33-664). Це свідчить про те, що така маса покриття не достатня для утворення суцільного шару  $\text{SiO}_2$  на поверхні магнетиту і сприяє окисненню поверхні. Проте при подальшому збільшенні

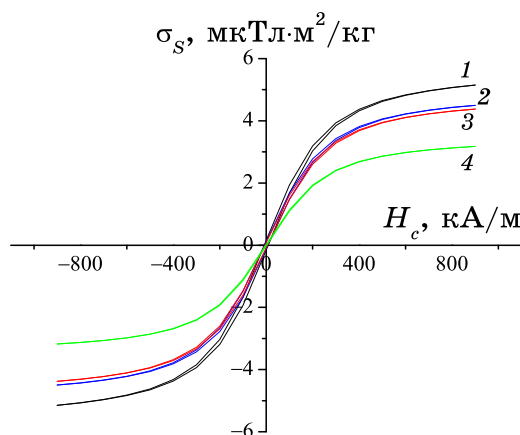


**Рис. 2.** ІЧ-Фур'є-спектри нанокмпозитів на основі магнетиту, модифікованого  $\text{SiO}_2$ . Вміст  $\text{SiO}_2$  (г) в поверхневому шарі нанокмпозита в розрахунку на 1 г магнетиту: 1 — 0,1; 2 — 0,2; 3 — 0,3; 4 — 0,68.

вмісту  $\text{SiO}_2$  в нанокмпозитах фаза  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  зникає в зв'язку з утворенням суцільного шару  $\text{SiO}_2$  на поверхні магнетиту. Аналогічна закономірність спостерігалася у роботі [9, 13], де встановлено, що мінімальна товщина шару, яка перешкоджає окисненню частинок магнетиту, забезпечується модифікуванням 0,15–0,18 г  $\text{SiO}_2$  на 1 г магнетиту, 1,5–1,8 мг на  $1 \text{ м}^2$  магнетиту.

Інфрачервоні спектри порошків немодифікованого магнетиту і нанокмпозитів  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ , одержаних з використанням прекурсорів силікату натрію наведені на рис. 2. Спектри немодифікованого магнетиту вже описувалися нами раніше [9]. Немодифікований магнетит має наступні смуги вбирання (СВ). СВ 442, 480 і  $580 \text{ см}^{-1}$  характеризують коливання зв'язків  $\text{Fe-O}$  оксидів заліза, що покривають поверхню частинок магнетиту [18, 19]. Смуги вбирання 895, 976,  $1050 \text{ см}^{-1}$  та  $1121 \text{ см}^{-1}$  належать деформаційним коливанням  $\text{Fe-OH}$  груп. Дифузний СВ в діапазоні  $2800\text{--}3500 \text{ см}^{-1}$  відповідає коливанням гідроксильних груп поверхні магнетиту та води в рідкій фазі і вказує на наявність водневих зв'язків [18, 19]. СВ при  $1655 \text{ см}^{-1}$  зумовлена деформаційними коливаннями молекул води, адсорбованої на поверхні магнетиту. Поява смуги вбирання  $1442 \text{ см}^{-1}$ , на нашу думку, не характерна для магнетиту і вказує на наявність адсорбованих іонів  $\text{NH}_4^+$ , що утворилися при реакції аміаку із залишковою водою на поверхні [18]. Нами встановлено, що інтенсивність цієї смуги значно зменшується після термооброблення магнетиту до  $380^\circ\text{C}$ .

Після модифікування поверхні магнетиту  $\text{SiO}_2$  силікатом натрію відбуваються значні зміни в спектрах відбиття нанокмпозитів (рис. 2). При вмісті 0,1 г  $\text{SiO}_2$  в поверхневому шарі нанокмпозита (на 1 г

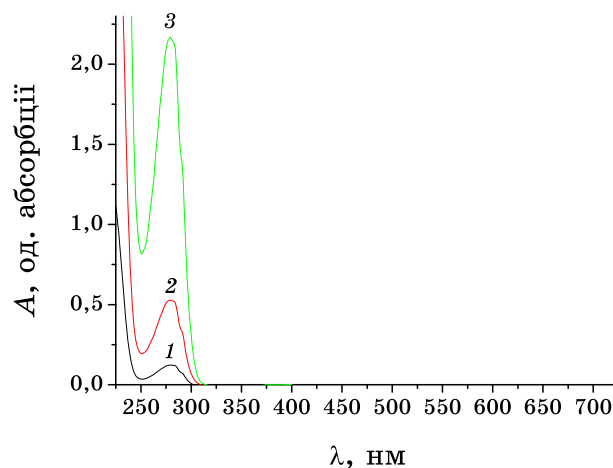


**Рис. 3.** Залежність магнетованости насичення ( $\sigma_s$ ) від напружености магнетного поля ( $H_c$ ) для вихідного магнетиту (1) та наноконкомпозитів, що містять 0,1 (2), 0,3 (3), 0,68 (4) грам  $\text{SiO}_2$  у поверхневому шарі на 1 г магнетиту, та були піддані термообробленню при  $450^\circ\text{C}$  протягом 2 год.

магнетиту) спостерігаються смуги вбирання при  $1080, 976, 895 \text{ см}^{-1}$ , що не належать магнетиту і характерні для оксиду кремнію [18, 19]. При збільшенні вмісту  $\text{SiO}_2$  до 0,2 г на 1 г магнетиту ІЧ-спектри змінюються, з'являються СВ  $1156$  та  $796 \text{ см}^{-1}$ , що також належать до  $\text{SiO}_2$ . [18, 19]. При вмісті оксиду кремнію 0,68 г на 1 г магнетиту спостерігаються смуги вбирання  $1070$  і  $799 \text{ см}^{-1}$ , що відповідають  $\text{SiO}_2$ . [9]. З літератури відомо, що смуги вбирання  $1070, 798, 460 \text{ см}^{-1}$  належать зв'язкам  $\text{Si-O-Si}$  у кремнеземі,  $970 \text{ см}^{-1}$  — валентні коливання зв'язків  $\text{Si-O}$  у групі  $\text{Si-OX}$  ( $X$  — в більшості випадків  $\text{H}$  або  $\text{Me}$ ) [19]. Окрім цих СВ спостерігається також дифузна смуга вбирання в області  $2800\text{--}3100 \text{ см}^{-1}$ , що відповідає коливанням гідроксильних груп поверхні  $\text{SiO}_2$  та води в рідкій фазі і свідчить про наявність водневих зв'язків [41]. Одержані СВ нагадують аналогічні для зразків наноконкомпозитів  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ , одержаних при використанні модифікуючого агента ТЕОС [9]. Таким чином, наявність покриття  $\text{SiO}_2$  на поверхні магнетиту не викликає сумнівів.

Розглянемо магнетні властивості одержаних наноконкомпозитів (рис. 3). Для них характерні вузькі петлі гістерези, типові для нанокристалічних матеріалів [9]. Виходячи з аналізу даної роботи і наших попередніх досліджень слід було очікувати, що питома магнетованість при насиченні  $\sigma_s$  в наноконкомпозиті буде зменшуватися при зменшенні об'єму в ньому магнетної компоненти у порівнянні з немодифікованим магнетитом при однаковому їх об'ємі. Проте зразок наноконкомпозита, що містить 0,1 г  $\text{SiO}_2$  в поверхневому шарі на 1 г магнетиту і випалений при  $450^\circ\text{C}$  протягом 2 годин в атмосфері аргону, має значення  $\sigma_s$  дещо нижчі, ніж очікувані. Таке зниження пов'язано з тим, що на-





**Рис. 4.** Спектри вбирання імуноглобуліну в діпазоні від 200 до 400 нм. Концентрація Ig становить: 1 — 0,4 мг; 2 — 1,6 мг; 3 — 6,1 мг в загальному об'ємі 3,2 мл.

нокомпозит має вміст  $\text{SiO}_2$  недостатній для повного покриття поверхні магнетиту (внутрішнього магнетного ядра), це призводить до окиснення непокритих шарів магнетиту, утворення немагнетної фракції  $\alpha\text{-Fe}_3\text{O}_4$  і зниження магнетних характеристик [9, 13, 20]. Збільшення маси покриття  $\text{SiO}_2$  до 0,2 зумовлює утворення суцільного покриття і перешкоджає окисненню магнетиту. Такий факт сприяє підвищенню значень наноккомпозита. Проте подальше підвищення маси немагнетного шару із  $\text{SiO}_2$  в наноккомпозиті призводить до зниження значень  $\sigma_s$ . Порівняння величини  $\sigma_s$  зразків із вмістом  $\text{SiO}_2$  в поверхневому шарі 0,68 г на 1 г магнетиту із відповідними значенням немодифікованого магнетиту свідчить, що таке збільшення маси зумовлює зниження  $\sigma_s$  на 38% (з 5,15 до 3,18 мкТл·м<sup>2</sup>/кг). При цьому величина коерцитивної сили  $H_c$  зменшується майже в 4 рази (з 8,36 до 2,15 кА/м). Отже можна стверджувати, що для забезпечення високих значень питомої магнетованости при насиченні необхідно обирати оптимальну масу немагнетного покриття в наноккомпозиті. Також потрібно ретельно виконувати синтезу наноккомпозитів, обирати раціональні умови синтезу і враховувати адсорбційну здатність поверхневого шару.

Розглянемо далі здатність одержаних наноккомпозитів з вмістом 0,1–0,68 г  $\text{SiO}_2$  (на 1 г магнетиту) до адсорбції імуноглобулінів при різних їх концентрації. Одержані результати свідчать, що Ig адсорбується при вбиранні 280 нм (рис. 4).

Нами встановлено, що кількість адсорбованого протягом 30 хв. імуноглобуліну зменшується від 35 мг до 14,7 мг на 1 г наноккомпозита із зменшенням вмісту  $\text{SiO}_2$  в поверхневому шарі від 0,1 до 0,3 г.

Таким чином, показано принципову можливість іммобілізації Ig

на поверхні одержаних нами нанокompatитів  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  та утворення імуносорбентів  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{Ig}$ . Подальшим кроком буде оцінка стійкості цих імуносорбентів у різних середовищах і створення імуномагнетного комплексу  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{Ig}$ /антиген та його апробація при деконтамінації плазми крові від вірусів.

#### 4. ВИСНОВКИ

Розроблено методики синтезу магнетокерованих біосумісних нанокompatитів на основі магнетиту, модифікованого оксидом кремнію (з використанням прекурсорів силікату натрію), а також на їх основі одержано імуносорбенти з іммобілізованим на їх поверхні імуноглобуліном людини. За допомогою методів РФА і ІЧ-Фур'є-спектроскопії ідентифіковані фази магнетиту і діоксиду кремнію в одержаних нанокompatитах. Встановлено, що максимальна кількість імуноглобуліну при фізичній адсорбції для нанокompatита магнетит/оксид кремнію при вмісті 0,1–0,2 г  $\text{SiO}_2$  (на 1 г магнетиту) складає відповідно 31–35 мг на 1 г нанокompatита. Показано, що величини питомої магнетованості при насиченні зразків нанокompatитів з вмістом 0,1–0,3 г немагнетних компонентів (на 1 г магнетиту) наближаються до відповідних значень вихідного магнетиту. Одержані нанокompatити  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  будуть застосовані для створення імуномагнетного комплексу  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{Ig}$ /антиген та апробовані при деконтамінації плазми крові від вірусів.

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. *Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направленный исследований* (Ред. М. К. Роко, Р. С. Уильямс) (Москва: Мир: 2002).
2. A. K Gupta, M. Gupta, *Biomaterials*, **26**: 3995 (2005).
3. П. М. Перехрестенко, Л. В. Назарчук, Н. І. Ларічева, *Діяльність закладів служби крові в Україні за 2004 рік* (Київ: 2005).
4. А. Т. Латкин, *Иммуномагнитная сепарация с последующей АТФ-метрией в экспрессиндикации шигелл Зонне* (Автореферат дисс. ... канд. мед. наук: Москва: 2005).
5. *Биотехнология. Итоги науки и техники* (Москва: Мир: 1988).
6. *Биология. Принципы и применения* (Ред. Хиггинс, Д. Бест, Дж. Джонс) (1989).
7. П. П. Горбик, А. Л. Петрановська, Л. П. Сторожук, І. В. Дубровін, Л. С. Семко, В. Ф. Чехун, *Хімія, фізика та технологія поверхні: Міжвід. зб. наук. пр.* (Київ: Наукова думка: 2006), вип. 11–12.
8. Л. С. Семко, П. П. Горбик, О. О. Чуйко, Л. П. Сторожук, І. В. Дубровін, О. І. Оранська, С. Л. Рево, *Доповіді НАН України*, № 2: 150 (2007).
9. Л. С. Семко, П. П. Горбик, Л. П. Сторожук, І. В. Дубровін, О. О. Чуйко, О. І. Оранська, О. І. Скрипка, *Доповіді НАН України*, № 3: 153 (2007).
10. J. Neil and L. Lee, Пат. 6447911 США, МКИ В32В 005/16, Silica Adsorb-

- ent on Magnetic Substrate — № 723446, 09.2002. — Prior. 10.09.2002.
11. J. Neil and L. Lee, Пат. 6924033 США, Int. Cl. B32B 005/16, Silica Adsorbent on Magnetic Substrate — №615998, 07.2003. — Prior. 2.08.2005.
  12. C. I. Brinker, C. W. Scherer, *Sol-Gel Science* (Boston-San Diego-New York: Academic Press. Inc.: 1990).
  13. Л. С. Семко, П. П. Горбик, Л. П. Сторожук, Л. С. Дзюбенко, *Фізика і хімія твердого тіла*, 8, № 3: 526 (2007).
  14. М. Е. Неймарк, Р. Ю. Шейнфайн, *Силикагель, его получение, свойства и применение* (Киев: Наукова думка: 1973).
  15. L. S. Semko, P. P. Gorbik, L. P. Storozhuk, I. V. Dubrovin et al., *Abstracts of Inter. Conf. 'Nanomaterials in Chemistry, Biology and Medicine'* (14-17 September, 2005) (Київ: 2005).
  16. А. Гринье, *Рентгенография кристаллов* (Москва: Гос. изд-во физ.-мат. лит.: 1961).
  17. Е. И. Оранская, Ю. И. Горнилов, Т. В. Фесенко, *Заводская лаборатория*, 60, № 1: 28 (1994).
  18. К. Накомото, *ИК-спектры и спектры неорганических и координационных соединений* (Мир: 1969).
  19. Л. Литтл, *Инфракрасные спектры адсорбированных молекул* (Москва: Мир: 1991).
  20. Л. С. Семко, П. П. Горбик, Л. П. Сторожук, Л. С. Дзюбенко та ін., *Укр. хім. журн.*, 73, № 10: 84 (2007).