

УДК 54.057+54.31+577.1

I. Герасимець, студ.
E-mail: Herasimets@i.ua, тел.: +38096 642 33 28;
О. Петренко, студ.
E-mail: Ksuha_Petrenko@ukr.net, тел.: +38097 664 31 83;
Т. Савченко, студ.
E-mail: Konfetka-t.s@ukr.net, тел.: +38068 034 17 10
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
Геологічний факультет, вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна
Ю. Карданець, асп., О. Гречанівський, ст. наук. співроб.,
Н. Дудченко, ст. наук. співроб.
Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М.П. Семененка
Національної Академії наук України,
пр. Паладіна, 34, м. Київ-142, Україна, 03680

СИНТЕЗ І ВЛАСТИВОСТІ СИНТЕТИЧНИХ АНАЛОГІВ БІОГЕННОГО МАГНЕТИТУ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук, доц. О.В. Митрохиним)

Стаття присвячена дослідженню впливу різних параметрів (ультразвук, магнітне поле) на властивості синтетичних наночастинок магнетиту. Розробка технологій створення синтетичних аналогів магнітних мінералів, локалізованих у тканинах живих організмів, в тому числі і в організмі людини, є актуальною для вирішення широкого кола мінералогічних, медико-біологічних та матеріалознавчих задач. Магнетит є одним з фізіогенних біомінеральних утворень в живих організмах, формування якого контролюється на генному рівні. Відомо, що магнітовпорядковані біогенні наночастинок оксидів та гідроксидів заліза, слугують для здійснення широкого ряду біологічних функцій, в тому числі, відповідають за орієнтацію тварин в просторі та грають важливу роль в функціонуванні мозку. Такі організми як перелітні птахи, бджоли, риби завдяки наявності магнетиту орієнтуються в просторі ("магнітний компас"), тому з-поміж багатьох відомих біомінералів магнетит завжди привертає до себе широкий інтерес.

В статті розглянуто способи синтезу наночастинок магнетиту під впливом магнітного поля та ультразвуку. Описано хімічний метод со-осадження, як один з найбільш простих методів синтезу магнітних наночастинок. Зразки наночастинок було синтезовано методом со-осадження солей Fe^{3+} та Fe^{2+} в лужному середовищі під впливом ультразвуку та магнітного поля і досліджено методами магнітометрії та рентгенофазового аналізу. Основну увагу автори статті акцентують на дослідженні магнітних властивостей та визначенні розміру кристалітів отриманого мінералу. В результаті проведених досліджень авторами встановлено та проаналізовано залежність розміру кристалітів від різних умов синтезу. Отримані експериментальні результати показали, під впливом ультразвуку розмір синтезованих наночастинок збільшується в порівнянні з наночастинками, отриманими без впливу ультразвуку. Встановлено, що зі збільшенням розміру наночастинок збільшується намагніченість зразків. Отримані дані можуть бути використані при розробці методів синтезу аналогів біогенного магнетиту.

Стаття може бути корисною для викладачів, студентів, наукових співробітників, для всіх, хто цікавиться біомінералогією та питанням синтезу магнітних наночастинок.

Ключові слова: біогенний магнетит, метод со-осадження, синтез, наночастинок, рентгенофазовий аналіз, магнітометрія.

Вступ. Постановка проблеми. Серед мінералів, вивченням яких займається наука мінералогія, є міне-

рали, кристалізація яких відбувається в живих організмах, в тому числі в організмі людини. До них відносять

© Герасимець І., Петренко Т., Савченко Т., Карданець Ю., Гречанівський О., Дудченко Н., 2014

кальцієві карбонати, кремнезем, фосфати, оксиди та гідрооксиди заліза. Найбільш типовим прикладом є частинки мінералів, які формують мінеральну компоненту кісток та зубів.

Після того, як в 1962 р. Х. Ловенстам відкрив у зубах хітона біогенний магнетит, а пізніше в 1975 р. Блейкмор виявив бактерії, що не опосередковано реагують на геомагнітне поле, цей мінерал привернув до себе широкий інтерес. Виявилось, що багато організмів здатні накопичувати магнетит, а він здатний передавати інформацію про магнітне поле до нервової системи. Вчені визнали, що це і є той самий "магнітний компас", за допомогою якого орієнтуються в просторі бджоли, риби, перелітні птахи, тварини. У людини магнетит знайшли в головному мозку [2].

Магнетит – один з біогенних, залізовмісних мінералів, що займає важливе місце серед продуктів біомінералізації організмів. Функціями такого мінералу (разом з ферігидритом) є перенесення і запас заліза у більшості організмів, в тому числі і людини, зміцнення радулярних зубів молюсків, орієнтація на місцевості бактерій, комах, бджіл, риб і птахів [1].

Окрім того, магнетит Fe_3O_4 є найпоширенішим матеріалом магнітних включень в біологічних системах, хоча зустрічаються і його різновиди: з браком катіонів – маггеміт ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) і заміщена форма – титаномагнетит. Магнетит являє собою обернену шпінель з формулою $\text{Fe}^{3+}[\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}]\text{O}_4$. Для нього властиві впорядковані магнітні моменти іонів заліза, що характерно для феромагнетиків. До того ж магнетит являється єдиним ферімагнітним мінералом біологічного походження [2].

Спроби охарактеризувати відкладення магнетиту в тканинах багатоклітинних тварин зустрічають ряд труднощів, що пов'язано з дуже малими кількостями матеріалу, диспергованого в тканинах. Кристали магнетиту, знайдені в черевних сегментах бджіл, в голові голубів і інших хребетних, мають субмікроскопічні розміри (<100 нм), масу 1-100 нг і займають сумарний обсяг від 10^{-10} до 10^{-8} см³. Виявлення таких кількостей магнетиту за їх магнітними властивостями в живих організмах можливо тільки завдяки тому, що кристали сконцентровані в певних структурах (мозок, зуби та ін.), а не розподілені рівномірно по всіх тканинах. Виявлення кристалів залежить також від того, чи достатня їхня концентрація в цих структурах, так щоб ці кристали можна було зареєструвати магнітометричними методами [1].

Як відомо, максимальний критичний розмір однодоменності для сферичних частинок магнетиту становить 128 нм. Частки, розмір яких перевищує один домен, можуть утворювати безліч доменів, магнітні моменти яких спрямовані в різні напрямки. Частинки ж менше певного розміру (близько 30 нм для магнетиту, в залежності від співвідношення геометричних розмірів) мають моменти, розташовані у випадковому порядку, тобто такі частинки стають суперпарамагнітними.

Протягом останніх десятиріч, інтенсивно розвивається синтез суперпарамагнітних наночастинок, і не тільки в інтересах фундаментальної науки, а також і для використання в багатьох технологічних процесах. Наприклад: для виробництва магнітних носіїв інформації, магнітних тонерів для принтерів, для біосенсорних та медичних пристосувань.

Є дуже багато методів синтезу магнітних наночастинок, які поділяються на фізичні та хімічні. Серед хімічних виділяють конденсаційні та методи диспергування компактного матеріалу, серед хімічних – термоліз металовмісних з'єднань, золь-гель метод, синтез магнітних наночастинок на межі поділу газової і рідкої фаз та інші [3].

В даній роботі використовувався метод со-осадження. Цей метод є найбільш простим та найбільш ефективним хімічним методом для отримання магнітних наночастинок.

Основною метою роботи є синтез аналогів біогенного магнетиту під впливом дії магнітного поля та ультразвуку. Це може бути корисним для подальшого синтезу магнетиту з заданими властивостями.

Матеріали та методи. Зразки 1, 2, 3 та 4 синтезували методом со-осадження солей Fe^{3+} та Fe^{2+} в лужному середовищі під впливом двох різних умов (магнітного поля та ультразвуку). Реагенти, що використовувалися для створення суспензії – $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, KOH та HCl .

Під час синтезу зразків, що відбувався під дією ультразвуку, був використаний ультразвуковий прибор UP200S (робоча частота 24 кГц, потужність 200 Вт) та магнітне поле 8 мТл.

Приготування реагентів виконувалось наступним чином:

- В 1М HCl для приготування розчинів заліза розчинити 21 мл концентрованої HCl в 250 мл води.
- В 1 мл 1М HCl розчинили 0,556 г 2М $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.
- В 4 мл 1М HCl розчинили 1,08 г 1М $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.
- В 500 мл води розбавили 126,81 г 2М KOH .

Розчинили кристалогідрати в 1М HCl , долили 50 мл 2М KOH і залишили суспензію при перемішуванні за температури 80°C на 1 год в термостаті. Потім суспензію промили бідистильованою водою до нейтральної реакції. В результаті реакції утворився осад чорного кольору.

Перший дослід проводився без магнітного поля, за початкової температури 17°C. Час виходу на режим (80°C) – 32 хв.

Другий дослід проводився в умовах магнітного поля, за початкової температури 15°C. Час виходу на режим (80°C) – 21 хв.

У третьому досліді синтез проводився під дією ультразвуку без магнітного поля, за початкової температури 8°C. Час виходу на режим (80°C) – 33 хв.

У четвертому досліді синтез проводився в умовах магнітного поля під дією ультразвуку, за початкової температури 7°C. Час виходу на режим (80°C) – 18 хв.

Результати та їх обговорення. Синтезовані магнітні наночастинок досліджували методами рентгенофазового аналізу та магнітометрії, які дають уявлення про середній розмір, фазовий склад кристалітів та їх магнітні властивості.

Основною задачею рентгенофазового аналізу є ідентифікація кристалічних речовин (фаз), що входять до складу аналізованого матеріалу та визначення розмірів кристалітів.

Рентгенофазовий аналіз досліджуваних зразків проведений на дифрактометрі ДРОН-3М, мідному випромінюванні ($\text{CuK}\alpha=1,54178 \text{ \AA}$). Область сканування зразків (2θ) – 10-70°. Результати діагностики порівнювались з еталонними зразками банку даних PCPDFWIN (PDF-2) 2003 р.

Для аналізу отриманих результатів було проведено порівняння міжплощинних відстаней синтезованих зразків зі стандартними значеннями для магнетиту та магеміту (у табл. 1 наведено рефлексі з інтенсивністю $I_{\text{hkl}} > 0,05 I_{\text{h}^* \text{k}^* \text{l}^*}$, де $\text{h}^* \text{k}^* \text{l}^*$ – найбільш інтенсивний рефлекс).

Стандартні значення міжплощинних відстаней для найбільш інтенсивних рефлексів магнетиту та магеміту відрізняються мало (табл. 1). Окрім того слід зазначити, що для нанорозмірних зразків відношення ширини рефлексів до їх висоти значно збільшується і точність їх визначення зменшується.

Таблиця 1

Порівняння міжплощинних відстаней синтезованих зразків зі стандартними значеннями для магнетиту та магеміту

Індекс hkl	Міжплощинні відстані зразків				Стандартні значення та інтенсивності			
	$d_{hkl(1)}$	$d_{hkl(2)}$	$d_{hkl(3)}$	$d_{hkl(4)}$	Магнетит		Магеміт	
					d_{hkl}	I_{hkl}	d_{hkl}	I_{hkl}
110	—	—	—	—	—	—	5,901	58
111	—	—	—	—	4,846	96	—	—
210	—	—	—	—	—	—	3,732	62
211	—	—	—	—	—	—	3,407	54
220	2,971	2,977	2,963	2,948	2,967	299	2,951	362
311	2,540	2,529	2,526	2,526	2,531	999	2,516	999
222	—	—	—	—	2,423	72	—	—
400	2,102	2,101	2,091	2,088	2,098	206	2,086	173
422	—	—	—	—	1,713	87	1,704	103
511	1,608	1,613	1,611	1,609	1,615	278	1,606	260
440	1,483	1,477	1,483	1,478	1,484	367	1,475	353
533	—	—	—	—	1,280	68	1,273	63
731	—	—	—	—	1,093	99	—	—

Також було розраховано постійну комірки для синтезованих зразків, використовуючи співвідношення для кубічних кристалів [5]:

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2}, \quad (1)$$

де a – постійна решітки кубічного кристалу, d – міжплощинна відстань.

Результати показують (табл. 2), що параметр a для зразку 3 практично збігається зі стандартним значенням для магнетиту. Параметр a для зразку 2 наближається до стандартних значень для магеміту.

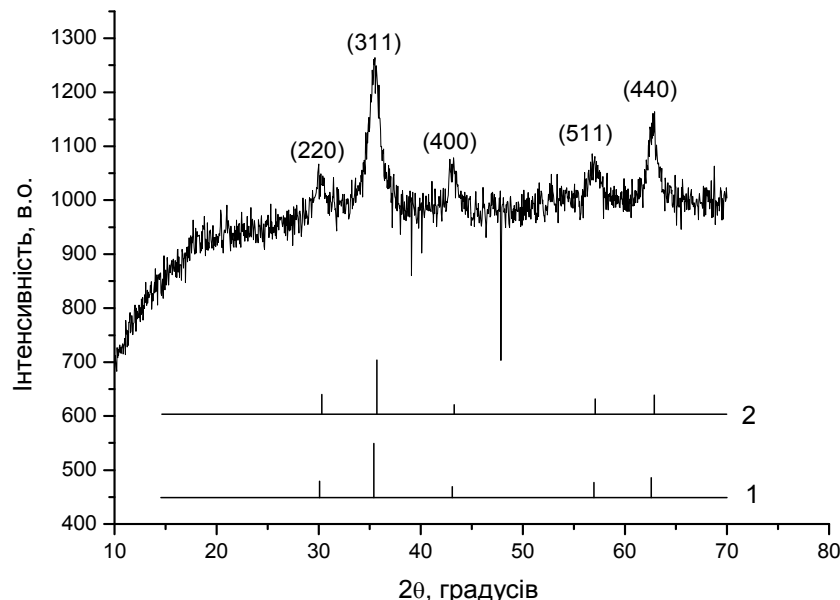


Рис. 1. Порівняння дифрактограми синтезованого зразка 2 з еталонними значеннями для магнетиту (1) та магеміту (2)

Таблиця 2

Порівняння постійної комірки а синтезованих зразків зі стандартними значеннями для магнетиту та магеміту

Постійна комірки				Стандартні значення	
$a(1)$	$a(2)$	$a(3)$	$a(4)$	Магнетит	Магеміт
8,362	8,333	8,392	8,362	8,393	8,3457

Виходячи з отриманих параметрів постійної комірки для синтезованих зразків було розраховано співвідношення дво- та тривалентного заліза x [6] за формулою:

$$a = 0,1148x + 8,3396 \quad (2)$$

де x – співвідношення дво- та тривалентного заліза, a – параметр постійної комірки.

Параметр x для магнетиту складає 0,5, а для магеміту – 0. Проміжні значення відповідають твердим розчинам магнетит/магеміт. Показано, що для зразків 1 та 4 параметр x дорівнює 0,2, тобто отримали твердий розчин магнетит/магеміт.

Метод рентгенофазового аналізу також дає можливість оцінити середній розмір зерен досліджених зразків. Ця величина була оцінена за допомогою формули Дебая – Шерера:

$$d_{кр} = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta}, \quad (3)$$

де $d_{кр}$ – середній розмір кристалітів, λ – довжина хвилі, що використовувалася $\lambda(\text{CuK}\alpha)=1,54051\text{\AA}$, β – ширина піка на половині висоти, θ – дифракційний кут, $k = 0,89$ [4].

Результати показують (табл. 3), що середній розмір кристалітів змінюється від 6,3 нм для зразку 1 до 10,5 нм для зразку 3.

Методом магнітометрії, використовуючи магнітометр з датчиком Хола, була досліджена намагніченість насичення (M_s) отриманих зразків 1-4. Для визначення абсолютної величини магнітного моменту (намагніченості) цих зразків виконувалась калібровка за еталонним зразком з відомою намагніченістю насичення. Як еталонний зразок використовувався чистий нікель, намаг-

ніченість насичення якого визначена з високою точністю ($54,5 \text{ A}^*\text{m}^2/\text{кг}$ при кімнатній температурі).

За отриманими графіками у вигляді кривих намагніченості (рис. 2), які показують залежність намагніченості речовини (M) від величини індукції магнітного поля (B), оцінили значення намагніченості насичення, які наведені нижче (табл. 3).

Таблиця 3
Значення намагніченості насичення та середніх розмірів частинок для зразків 1-4

Зразок	Розмір частинок, нм	Намагніченість насичення, $\text{A}^*\text{m}^2/\text{кг}$
Зразок 1	$6,3 \pm 0,1$	24 ± 1
Зразок 2	$7,0 \pm 0,1$	32 ± 1
Зразок 3	$10,5 \pm 0,1$	37 ± 1
Зразок 4	$7,1 \pm 0,1$	32 ± 1

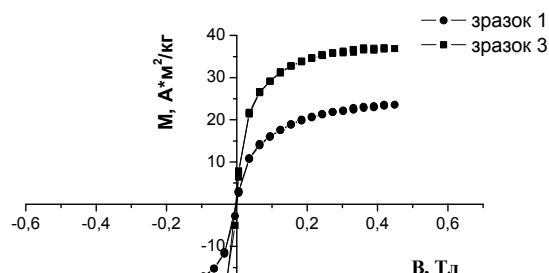


Рис. 2. Вигляд кривої намагніченості для зразків 1 та 3

З графіку (рис. 2) видно стрімке початкове зростання намагніченості частинок із зростанням поля, а потім поступове підвищення до насичення. В нашому випадку, форма кривих гістерезису синтезованих зразків надзвичайно вузька, що є характерною ознакою суперпарамагнітних наночастинок.

Отримані експериментальні результати показують наступне. В умовах магнітного поля розмір частинок збільшується (зразок 2). Дія ультразвуку ще більше збільшує розмір частинок (зразок 3). Однак одночасна дія магнітного поля та ультразвуку призводить до меншого ефекту, ніж дія ультразвуку без магнітного поля (зразок 4).

Отримані дані також показують, що зі збільшенням розміру частинок збільшується намагніченість зразків. Подібна закономірність раніше була відмічена в статті [7].

Така залежність може бути пов'язана з тим, що іони Fe на границях між кристалітами не вносять вклад у загальну намагніченість. Зі збільшенням розміру кри-

сталітів відносна доля таких іонів зменшується і загальна намагніченість збільшується.

Висновки.

1. Розроблено технологію та створено зразки синтетичного наномагнетиту за різних умов (вплив магнітного поля, ультразвукової обробки). Створені зразки досліджено методами магнітометрії та дифракції рентгенівських променів. Показано, що розмір синтезованих наночастинок лежить в діапазоні 10 нм, а намагніченість насичення досягає $40 \text{ A}^*\text{m}^2/\text{кг}$. Тобто, властивості синтезованих наночастинок подібні до властивостей біогенних наночастинок магнетиту.

2. Показано, що накладання ультразвукових коливань на реакційну суміш призводить до підвищення намагніченості насичення зразків в порівнянні із зразками, що було синтезовано у відсутності ультразвукових коливань, а накладання магнітного поля на реакційну суміш, навпаки – знижує намагніченість насичення зразків. Одночасна дія магнітного поля та ультразвуку призводить до меншого ефекту, ніж дія ультразвуку без магнітного поля.

3. Отримані результати можуть бути корисними для створення синтетичних аналогів біогенного магнетиту.

Подяки. Автори статті вдячні чл.-кор. НАН України, професору О.Б. Брику за корисні зауваження.

Список використаних джерел:

1. Дудченко Н.А., (2011). Свойства биогенных магнитных минералов. Минералогические перспективы: Матер. междунар. минералогического семинара. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 45-46.
2. Dudchenko N.A., (2011). Svoystva biogennikh magnitnikh mineralov. Mineralogicheskie perspektivi: Materiali mezhdunarodnogo mineralogicheskogo seminar. Syktyvkar: IG Komi NTS UrO RAN, 45-46 (In Russian).
3. Киршвинк Дж., Джонс Д., Мак-Фадден Б., (1989). Биогенный магнетит и магниторецепция. Новое о бимagnetизме / пер. с англ. В.А.Троицкой. М.: Мир, 353.
4. Krishvink Dzh., Dzons D., Mak-Fadden B., (1989). Biogenniy magnetit i magnitoretseptiya. Novoe o biomagnetizme. M.: Mir, 353 (In Russian).
5. Губин С.П., Кокшаров Ю.А., Хомутов Г.Б., Юрков Г.Ю., (2005). Магнитные наночастицы: методы получения, строение и свойства, 74, 6, 539-574.
6. Gubin S.P., Koksharov YU.A., Khomutov G.B., Yurkov G.YU., (2005). Magnitnie nanochastitsi: metodi polucheniya, stroenie i svoystva, 74, 6, 539-574 (In Russian).
7. Шнюков С.Е., Андреев О.В., Савенок С.П., Лазарева И.И., (2006). Фізичні методи дослідження хімічного складу мінеральної речовини. К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 36.
8. Shnyukov S.E., Andreev O. V., Savenok S.P., Lazareva I.I., (2006). Fizichni методи doslidzhennya khimichnogo skladu mineralnoyi rechovin. K: Vidavnicho-poligrafichnyi tsentr "Kiyivskiyi universitet", 36 (In Ukrainian).
9. Cornell R.M., Schwertmann U., (2003). The Iron Oxides. Structure, properties, reactions, occurrences and uses. Wiley, 664.
10. Gorski C.A., (2009). Redox behavior of magnetite in the environment: moving towards a semiconductor model. PhD diss., University of Iowa, 215.
11. Sharma S.K., Kumar Ravi, Kumar V.V. et al., (2007). Size dependent magnetic behaviour of nanocrystalline spinel ferrite $\text{Mg}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{Fe}_2\text{O}_4$. Indian Journal of Pure & Applied Physics, 45.

Надійшло до редколегії 07.07.13

I. Gerasimets, Student, Tel.: +38096 642 33 28, E-mail: Herasimets@i.ua,
O. Petrenko, Student, Tel.: +38097 664 31 83, E-mail: Ksuha_Petrenko@ukr.net,
T. Savchenko, Student, Tel.: +38068 034 17 10, E-mail: Konfetka-t.s@ukr.net,
Geological Faculty, Taras Shevchenko National University of Kyiv
90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022 Ukraine
J. Kardanets, Postgraduate Student, A. Grechanovsky, Senior Research Associate,
N. Dudchenko, Senior Research Associate
M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation
National Academy of Sciences of Ukraine
34 Acad. Palladina Ave., Kyiv, 142, 03680, Ukraine

SYNTHESIS AND PROPERTIES OF BIOGENIC MAGNETITE SYNTHETIC ANALOGUES

This paper deals with different factors (ultrasonication, magnetic field) in determining the properties of synthesized magnetite nanoparticles. Development of technologies for creating synthetic analogues of magnetic minerals localized in human and other living organism tissues is of great importance in solving a wide range of mineralogical, medical-biological and material science problems. Magnetite is one of the physiological biominerals in living organisms, its formation being genetically determined. Magnetically ordered biogenic nanoparticles of iron oxides and hydroxides, which are biominerals, are known to realize a wide range of biological functions, including animals' orientation in space, and to play an important role in brain functioning. Migratory birds, bees, fish develop a sense of direction in space ("magnetic compass") due to the presence of magnetite, which is why this vital biomineral is of wide scientific interest.

The paper describes the methods of magnetite nanoparticle synthesis using a magnetic field and ultrasound. Co-precipitation is described as one of the easiest chemical methods of synthesizing magnetic nanoparticles. Samples were synthesized by employing the method of co-precipitation of Fe^{3+} and Fe^{2+} salts in an alkaline medium involving ultrasound and magnetic fields. X-ray diffraction and magnetometry were used to study the samples. Special attention was given to the magnetic properties and determining the crystallite size of the produced mineral. The research results showed a correlation between the crystallite size and various synthesis conditions. With ultrasound applied, the size of the synthesized nanoparticles tends to be bigger as compared to that of the nanoparticles obtained without ultrasonication. It was determined that magnetization of samples increases with the increase in the size of nanoparticles. The research results are summarized in the tables and

illustrations presented in the paper. The obtained data can be used for developing and improving the technologies for biogenic magnetite analogue synthesis. The paper could be of use to teachers, students, and researchers interested in biomineralogy and magnetic nanoparticle synthesis.

Keywords: biogenic magnetite, co-precipitation method, synthesis, nanoparticles, X-ray analysis, magnetometry.

И. Герасимец, студ., Тел.: +38096 642 33 28, Herasimets@i.ua,
О. Петренко, студ., Тел.: +38097 664 31 83, Ksuha_Petrenko@ukr.net,
Т. Савченко, студ., Тел.: +38068 034 17 10, Konfetka-ts@ukr.net,
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко
Геологический факультет, ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина
Ю. Карданец, асп., А. Гречановский, ст. науч. сотрудник,
Н. Дудченко, ст. науч. сотрудник
Институт геохимии, минералогии и рудообразования им. М.П. Семененко НАН Украины,
пр. Паладіна, 34, м. Київ-142, Україна, 03680

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА СИНТЕТИЧЕСКИХ АНАЛОГОВ БИОГЕННОГО МАГНЕТИТА

Статья посвящена вопросу синтеза аналогов биогенного магнетита. Разработка технологий создания синтетических аналогов магнитных минералов, локализованных в тканях живых организмов, в том числе и в организме человека, особенно актуальна в условиях развития науки и медицины. Магнетит является одним из физиогенных биоминеральных образований в живых организмах, формирование которого определяется генетически. В живых организмах, в организме человека биогенный магнетит отвечает за перенос и запас железа. Такие организмы как перелетные птицы, пчелы, рыбы благодаря наличию магнетита ориентируются в пространстве ("магнитный компас"), поэтому из многих известных биоминералов магнетит всегда привлекает к себе широкий интерес.

В статье рассмотрен синтез наночастиц биогенного магнетита под воздействием магнитного поля и ультразвука. Описан химический метод со-осаждения, как один из самых простых методов синтеза магнитных наночастиц. Образцы наночастиц были синтезированы методом со-осаждения солей Fe^{3+} и Fe^{2+} в щелочной среде под воздействием ультразвука и магнитного поля и исследованы методами магнитометрии и рентгенофазового анализа. Основное внимание авторы статьи акцентируют на исследовании магнитных свойств и определении размера кристаллитов полученного минерала. В результате проведенных исследований авторами установлена и проанализирована зависимость размера кристаллитов от различных условий синтеза. Полученные экспериментальные результаты показали, что в условиях магнитного поля размер синтезированных наночастиц увеличивается, под воздействием ультразвука он увеличивается существенно. Установлено, что с увеличением размера наночастиц увеличивается намагниченность образцов. Представленные в статье таблицы и иллюстрации предоставляют информацию о полученных результатах исследований. Полученные данные могут быть использованы при синтезе аналогов биогенного магнетита.

Статья может быть полезной для преподавателей, студентов, работников медицинской отрасли, для всех, кто интересуется биоминералогией и вопросами синтеза магнитных наночастиц.

Ключевые слова: биогенный магнетит, метод со-осаждения, синтез, наночастицы, рентгенофазовый анализ, магнитометрия.