

Поліфункціональні магнітні наночастинки: застосування у медицині

І.С. Чекман¹, Н.О. Горчакова¹, Г.О. Сирова², О.О. Мітюшова¹

¹Національний медичний університет імені О.О. Богомольця, Київ
²Харківський національний медичний університет

Узагальнені фізико-хімічні, фармакологічні та токсикологічні властивості магнітних наночастинок (заліза оксиду, уреа біфосфонату, нанокмполімерів оксиду заліза зі сріблом, золотом, кадмієм та інших наночастинок), методи їх отримання. Описані механізми дії магнітних наночастинок на організм людини. Показана сфера можливого їх застосування у медицині — для ідентифікації бактерій, очищення білка, у вигляді контрастних речовин та лікарських засобів.

Ключові слова: поліфункціональні магнітні наночастинки, методи синтезу, застосування у медицині, заліза оксид, уреа біфосфонат.

Вступ

Поєднання нанотехнологій та молекулярної біології започаткувало основи нової галузі досліджень — нанобіотехнології. Встановлено, що зі зменшенням розмірів частинок від 100 до 10 нм відмічають порівняно слабкі зміни фармакологічних властивостей відносно макропрепаратів, а в діапазоні 10–0,1 нм — виражені зміни як фізико-хімічних, так і фармакологічних та токсикологічних властивостей речовин (Чекман І.С., 2011; Чекман І.С. та співавт., 2012).

Класифікують наночастинки залежно від величини, форми, розмірів, що має значення для їх окремих властивостей. До наночастинок належать ліпосоми, наноемульсії, полімерні наночастинки, металеві наночастинки, наноболонки, фулерени, дендримери, квантові мітки та ін. Магнітні наночастинки різного походження є наноматеріалами, що мають контрольований розмір, поліпшену контрастність та чутливість до зовнішнього впливу, тому ці наночастинки широко використовують у медицині з метою розробки діагностичних тестів, а також як контрастні та лікарські речовини (Gao J. et al., 2009).

До переваг магнітних наночастинок слід віднести в першу чергу їх розміри, що дозволяють їм швидко проникати крізь мембрану. По-друге, завдяки магнетизму можна здійснювати контроль за їх пересуванням і накопиченням на відстані. По-третє, також завдяки магнетизму їх можна застосовувати як контрастні речовини для ядерно-магнітної томографії (Whitesides G.M., 2003). З цієї метою створені монодисперсні магнітні наночастинки оксиду заліза, кінетика яких контролюється і які широко впроваджуються в біомедицину (Sun S., 2006; Park J. et al., 2007).

На сьогодні існує два головних методи утворення магнітних поліфункціональних наноструктур. Перший метод — це молекулярна функціоналізація. Біофункціональні макромолекули (наприклад антитіла, ліганди) обгортають магнітні наночастинки та зумовлюють їх взаємодію з субстратом завдяки міцному зв'язку з певними хімічними залишками біологічно активних речовин, таким чином забезпечуючи регульо-

ваний спосіб «маркування», отримані комплекси макромолекул та магнітних наночастинок називають функціональними молекулами. Після молекулярної функціоналізації біофункціональні магнітні наночастинки володіють високою вибірковою та чутливістю до взаємодії з рецепторами, ферментами, фрагментами іонних каналів та іншими субстратами.

Наступний спосіб полягає у взаємодії магнітних наночастинок та їх нанокмполімерів із субстратом за допомогою послідовного зв'язку з активними групами субстрату, що створює єдиний компонент, який має багато функцій. Наприклад, використовуючи магнітні наночастинки як основу для створення напівпровідникових мідьпохідних, можна створити оболонку або гетеродимерні наноструктури як з магнітними, так і флуоресцентними ознаками, що може бути перспективним засобом для подвійної функціональної молекулярної візуалізації (тобто поєднання магнітно-ядерної та флуоресцентної діагностики). Наночастинки металів можуть взаємодіяти з іншими наночастинками і створювати гетеродимерні структури, в яких розрізняють властивості залежно від їх здатності взаємодіяти з певними рецепторами. Протипухлинні засоби можна поєднувати з наночастинками оксиду заліза і вміщувати в ліпосоми для регульованої доставки ліків. Специфічний зв'язок з клітинами пухлини забезпечують як протипухлинний засіб, так і біофункціональні магнітні наночастинки дисульфід заліза, що дозволяє реалізувати лікарському засобу специфічну дію та магнетизм. Ці наночастинки можуть мати полімерне покриття, через яке вони обмінюються з лігандами або взаємодіють з активними групами дезоксирибонуклеїнової кислоти (ДНК) (Gao J. et al., 2008).

Взаємодія біомолекулярних комплексів з певними активними групами існує переважно у природі. Біомолекули можуть поєднуватися з магнітними наночастинками металів, утворений комплекс також може поєднуватися з іншими молекулами. Найбільш вірогідним наслідком утворених комплексів є здатність зовнішньої магнітної сили контролювати розташування біологічно активних

молекул в цих комплексах. Біофункціональні магнітні наночастинки використовують для визначення патогенних бактерій у зовнішньому середовищі, очищення білка та виведення токсинів з організму людини (Safarik I., Safarikova M., 2004; Gao J. et al., 2006a).

Ідентифікувати бактерії при низьких концентраціях важко, зазвичай це потребує багато часу перед подальшим аналізом. Визначення бактерій при ультранизьких концентраціях без процедур, що потребують часу, є вигідним при проведенні клінічної діагностики. Розвинуто нову стратегію, яку можна використовувати для визначення та захоплення патогенних мікроорганізмів, таких як ентерокок, та інших грампозитивних бактерій при їх низьких концентраціях, за допомогою наночастинок комплексу ванкомицину — залізо — платина (Gu H. et al., 2003). Встановлено механізм взаємодії цього комплексу з бактеріями, визначена полівалентна взаємодія між ванкомицином та поліпептидом бактерій, який вміщує D-аланін-D-аланін. Крім того, на поверхні бактерій наночастинки комплексу нанозаліза з платиною взаємодіють з неспецифічними групами NH_2 і викликають загибель бактерій. Висока чутливість бактерій саме до комплексу ванкомицину — залізо — платина пов'язана з тим, що ці частинки мають властивості, подібні до антитіл (таких як IgG), що веде до знешкодження бактерій (Gu H. et al., 2003; Kell A.J. et al., 2008). Скануючий електронний мікроскоп може легко відрізнити бактерію від агрегатів органічних та неорганічних речовин відповідно до їх мікро- або нанорозмірів. Комплекс ванкомицину — залізо — платина ідентифікує й одночасно знешкоджує бактеріальні штами, такі як золотистий стафілокок та інші види грампозитивних бактерій в ультранизьких концентраціях. Комплекс ванкомицину — залізо — платина в наночастинках може також захоплювати або знижувати активність грамнегативних бактерій, таких як кишкова паличка, запобігаючи впливу на травний канал (Gu H. et al., 2003; Kell A.J. et al., 2008).

Використання біофункціональних магнітних наночастинок для захоплення бактерій є особливо корисним, коли полімерну

ланцюгову реакцію застосувати неможливо. Завдяки процедурі поєднання ванкоміцин-залізо-платинових біофункціональних магнітних наночастинок з флуоресцентними барвниками можна досягнути швидкого, чутливого та дешевого методу виявлення бактерій в крові (Gao J. et al., 2006a).

Наночастинки комплексу залізо — платина є основою для утворення композиту з ванкоміцином. Ванкоміцин завдяки флуоресцентним властивостям фарбує бактерію, що дозволяє швидко її ідентифікувати за допомогою мікроскопічної флуоресценції. Можна встановити різні види бактерій при поєднаному застосуванні біофункціональних магнітних наночастинок з особливим антибіотиком, але цей метод може мати обмежену точність та коштувати дорого. Щоб швидко та точно визначити тип натягу при низькій концентрації бактерій, значення мають накопичення магнітних наночастинок в бактерії та ідентифікація полімерно-ланцюгової реакції між магнітними наночастинами та ДНК. Тому біофункціональні магнітні наночастинки допомагають відкрити нову перспективу у виявленні патогенних організмів та діагностиці захворювань (Gao J. et al., 2006a).

Очищення і обробка білків є дуже важливими для їх подальшого вивчення з метою застосування в біології та медицині. Серед існуючих методів магнітне очищення білків при застосуванні наночастинок дозволяє виділити певні види білків та клітин. Наприклад, використовуючи допамін як модель для фіксації магнітних наночастинок металів, можна виділити деякі гістидинмісні білки. Завдяки значній площі наночастинок можна виділяти білки зі специфічними властивостями, такі як альбуміни, глобуліни тощо. Магнітні наночастинки можливо використовувати повторно без втрати їх ефективності. Хоча очистка білків, що базується на спорідненості наночастинок металів та їх композитів до мішеней, остаточно не визначена. Завдяки взаємодії магнітних наночастинок металів з біологічними мішенями та токсинами, вони відіграють важливу роль у виведенні токсинів з інфікованих організмів (Leroux J.C., 2007).

Наприклад, поліфункціональні магнітні наночастинки, що містять уранілу біфосфонат з високою спорідненістю, можуть виводити оксид урану з водного середовища та крові. Крім того, можливе виведення радіонуклідів із біологічних середовищ за допомогою цих наночастинок. Магнітні наночастинки можуть бути успішно використаними як агенти для вибіркового швидкого виведення радіонуклідів з живих організмів. Магнітні наночастинки оксиду заліза виводять 69% оксиду урану з крові. Це перший приклад виділення радіонуклідів з біологічної рідини наночастинами. Таким чином, функціоналізовані, біосумісні магнітні наночастинки можуть діяти як корисні речовини для виведення з організму людини радіоактивних металів, таких як уран (Wang L. et al., 2006).

Барвники та ліки

Важливим аспектом сучасних нанотехнологій є дослідження впливу на організм магнітних наночастинок, поєднаних з іншими

функціональними молекулами. Через те, що органічні барвники використовують як зонди для дослідження біологічних процесів, їх поєднання з магнітними наночастинами можна застосовувати як контрастні речовини для магнітно-ядерного резонансу. Відоме існування багатофункціональних нанозондів, що можуть застосовуватися для магнітно-ядерної томографії та оптичного зображення (Wang L. et al., 2006; Cheon J., Lee J.H., 2008). Наприклад, поєднання наночастинок оксиду заліза та порфірину може привести до створення біомодального зображувального нанозонду (Gu H. et al., 2005a). Добре вивчені фармакокінетика та низька системна токсичність порфіринових похідних сприяли проведенню клінічних досліджень із використання цих хімічних сполук у фотодинамічній терапії. Тому модифіковані наночастинки оксиду заліза з порфірином можуть діяти як мультифункціональні і застосовуватися для лікування пухлин та неінвазивного магнітно-резонансного зображення.

При діагностиці в онкології та інших галузях медицини велике значення має флуоресценція. Цей метод потребує застосування органічних флуорофорів, що виділені у діапазоні дії 700 нм, який є наближенням до дії інфрачервоного світла. Дослідження з використанням органічних зондів, які мають виражену цитотоксичність, хоча і є стабільними, але дуже обмежені. Наноструктури забезпечують необхідне поєднання різних наноконпонентів в єдину структуру, що має багатофункціональні властивості та значний потенціал. Магнітні наночастинки можуть поєднувати якості методів для визначення як магнітних, так і флуоресцентних ознак, що досягається завдяки створенню різних наноконкомпозитів шляхом нарощування металевих наночастинок на різні макроструктури (антибіла тощо), що є основою для створення нанопрепаратів (Gu H. et al., 2004; Gao J. et al., 2007; 2008; Gao J., Xu B., 2009).

Квантові мітки у створенні наноструктур

Квантові точки (quantum dots або qdots) застосовують для вивчення субклітинних процесів у біології та для цілеспрямованого створення гібридних наноструктур, що мають якості флуоресценції та магнетизму. Наприклад, залізо-платинові оболонки з кобальтом, кадмієм, селеном та залізо-платинові, сульфід-цинкові нанотрубки (Gu H. et al., 2005b; Kim H. et al., 2005; Michael X. et al., 2005).

Залізо-платинові наночастинки та наноконпоненти з приєднанням наночастинок міді утворюють різноманітні гібридні наноструктури. Комбіновані наночастинки мають якості супермагнетизму і флуоресценції, здатні змінювати внутрішньоклітинні процеси — активність ферментів, вміст показників енергетичного обміну, нуклеїнових кислот тощо (Jiang J. et al., 2008).

Внутрішньоклітинне переміщення магнітних наночастинок буде використане для застосування в біології, тому що це дає можливість знайти різницю між апікальними і базолатеральними ділянками у поляризованих клітинах з асиметричною локалізацією магнітних наночастинок, які несуть певні ліганди. Флуоресцентні магнітні на-

ночастинки мають швидку реакцію на вплив магнітної сили (Michael X. et al., 2005).

Металеві наночастинки (наприклад золото, срібло і платина) привернули увагу вчених частково через їх оптичні властивості. Розроблені прилади, які об'єднують оптичне відображення і визначення теплоенергетики, що можна використовувати для фототеплової терапії. Завдяки цьому комбінації металевих і магнітних наночастинок застосовуються за новим показанням в біомедицині (Skralak S.E. et al., 2008).

Один з найпростіших і найефективніших методів створення поліфункціональних магнітних наночастинок — це послідовне створення металевих компонентів на колоїдній основі магнітних наночастинок. Іншим способом виготовляли гетеродимери оксиду заліза-золота в гомогенній органічній солі, завдяки чому реалізується вивільнення наночастинок золота, що мають окиснювальні властивості. Структура гетеродимера дозволяє створювати наночастинки з двома різними поверхнями. Різні види функціональних молекул можуть ковалентно зв'язуватися з певними частинами гетеродимерів. Існують гетеродимери, що складаються з комплексу оксиду заліза та золота, що добре розчиняються (Yu H. et al., 2005). Багатофункціональні гетеродимери, які реагують на магнітні сили, збільшують поглинання резонансу і розсіювання, зв'язуються з певним рецептором. Наприклад, оксид заліза може активувати біомолекули зі специфічною дією, відігравати роль утримувального захоплювача, використовувати допамін як утримувальний захоплювач (Lee H. et al., 2007). Саме залізо або срібло у поєднанні з тіоловими залишками можна використовувати для створення нових активних похідних тіолу. Димери, що містять нанокон'югат оксиду заліза і золота, мають значення при переміщенні сполук в клітинах і тому можуть мати різне призначення в біології і медицині (Jiang J. et al., 2008; Xu C. et al., 2008).

Наноструктури яєчного жовтка (ліпосоми)

Використовуючи магнітні наноструктури як носії доставки лікарських засобів, зв'язували, що дані структури являють собою активний і багатообіцяючий об'єкт дослідження для біомедичних застосувань (Neuberger T. et al., 2005). Звичайна і пряма стратегія доставки лікарських засобів у поєднанні з магнітними наночастинами включає використання полімерів, щоб покрити магнітні наночастинки та інкапсулювати препарати, а також створити нанокapsули або міцели (Gupta A.K., Gupta M., 2005). Комплекс наночастинок залізо — оксид — платина — кобальт у ліпосомах з яєчного жовтка можна використовувати як потенційний лікарський нанозасіб. Як нетрадиційний приклад нової доставки лікарських засобів можна представити систему із використанням магнітних наночастинок для безпосередньої інкапсуляції потенційних протипухлинних засобів. Препарат платини без будь-якого поверхневого покриття може діяти як потенційний протипухлинний засіб, наприклад, відомий цисплатин (Yin Y. et al., 2004; Gao J. et al., 2006b; Peng S., Sun S., 2007).

Додавання до препарату наночастинок кобальту з сіркою підвищує його проникність у ракову клітину. Це дозволяє цисплатину надходити в ядро мітохондрії, пошкоджувати подвійні ланцюги ДНК клітини, що призводить до апоптозу HeLa-клітини, дія якого подібна до взаємодії між цисплатиною і ДНК. Цей механізм (включаючи пошкодження ДНК) вимагає більш конкретного доказу і потребує досліджень в зв'язку з підвищеною цитотоксичністю комплексу оксиду платини із сульфідом кобальту (Peng S., Sun S., 2007).

Висновки

Проведені дослідження дозволили встановити, що магнітні наночастинок є перспективними засобами для медицини завдяки високоселективним зв'язкам з біологічними лігандами, наприклад такими, як антитіла або білки. Ці препарати володіють не тільки парамагнетизмом, але також флуоресценцією та оптичною контрастністю, що розширює сферу їх застосування у медицині.

Здійснено синтез двох класів багатofункціональних магнітних наночастинок: молекулярно-функціональних та їх похідних. Ці два підходи є додатковими до інших методів, вони об'єднують різні окремі наночастинок через полімерне покриття (Selvan S.T. et al., 2007; Kim J. et al., 2008). Поліфункціональні магнітні наночастинок з високою селективністю і високою чутливістю є перспективними при виявленні бактерій, очищенні білків, важливій для створення нових препаратів, які сприяють руйнуванню пухлин, а також при розробці нових методів діагностики. Магнітні гібридні наночастинок відкривають їх нове біомедичне застосування. Наприклад, метод ядерно-магнітної томографії, при якому застосовують магнітні контрастні наночастинок, дозволяє отримувати багатомодальне зображення, яке поєднує оптичне та позитронно-емісійне томографічне відображення. У застосуванні багатofункціональних магнітних наночастинок ще досі є не вирішені проблеми, головною серед яких залишається контроль їх структури. Дослідники повинні розробити найкращі умови для того, щоб використати наночастинок, у яких є точний склад, однорідна поверхня, здатність до модифікації і багатofункціональність. Крім того чистота, дисперсність, стабільність багатofункціональних магнітних наночастинок є дуже важливими. Тому відкриваються перспективи для подальшого дослідження поліфункціональних магнітних наночастинок як діагностичних, лікувальних засобів, в тому числі для цілеспрямованої доставки препаратів.

Список використаної літератури

- Чекман І.С. (2011) Нанофармакологія. За друга, Київ, 424 с.
 Чекман І.С., Ульберг З.Р., Маланчук В.О. та співавт. (2012) Нанонаука, нанобіологія, нанофармакологія. Поліграф плюс, Київ, 328 с.
 Cheon J., Lee J.H. (2008) Synergistically integrated nanoparticles as multimodal probes for nanobiotechnology. *Acc. Chem. Res.*, 41(12): 1630–1640.
 Gao J., Gu H., Xu B. (2009) Multifunctional magnetic nanoparticles: design, synthesis, and biomedical applications. *Acc. Chem. Res.*, 42(8): 1097–1107.
 Gao J., Li L., Ho P.-L. et al. (2006a) Combining fluorescent probes and biofunctional magnetic

nanoparticles for rapid detection of bacteria in human blood. *Advanced Materials*, 18(23): 3145–3148.

Gao J., Xu B. (2009) Applications of nanomaterials inside cells. *Nano Today*, 4(1): 37–51.

Gao J., Zhang B., Gao Y. et al. (2007) Fluorescent magnetic nanocrystals by sequential addition of reagents in a one-pot reaction: a simple preparation for multifunctional nanostructures. *J. Am. Chem. Soc.*, 129(39): 11928–11935.

Gao J., Zhang B., Zhang X., Xu B. (2006b) Magnetic-dipolar-interaction-induced self-assembly affords wires of hollow nanocrystals of cobalt selenide. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 45(8): 1220–1223.

Gao J., Zhang W., Huang P. et al. (2008) Intracellular spatial control of fluorescent magnetic nanoparticles. *J. Am. Chem. Soc.*, 130(12): 3710–3711.

Gu H., Ho P.-L., Tsang K.W. et al. (2003) Using biofunctional magnetic nanoparticles to capture vancomycin-resistant enterococci and other gram-positive bacteria at ultralow concentration. *J. Am. Chem. Soc.*, 125(51): 15702–15703.

Gu H., Xu K., Yang Z. et al. (2005a) Synthesis and cellular uptake of porphyrin decorated iron oxide nanoparticles — a potential candidate for bimodal anticancer therapy. *Chem. Commun. (Camb.)*, 34: 4270–4272.

Gu H., Zheng R., Liu H. et al. (2005b) Direct synthesis of a bimodal nanosponge based on FePt and ZnS. *Small*, 1(4): 402–406.

Gu H., Zheng R., Zhang X., Xu B. (2004) Facile one-pot synthesis of bifunctional heterodimers of nanoparticles: a conjugate of quantum dot and magnetic nanoparticles. *J. Am. Chem. Soc.*, 126(18): 5664–5665.

Gupta A.K., Gupta M. (2005) Synthesis and surface engineering of iron oxide nanoparticles for biomedical applications. *Biomaterials*, 26(18): 3995–4021.

Jiang J., Gu H., Shao H. et al. (2008) Bifunctional Fe₃O₄-Ag heterodimer nanoparticles for two-photon fluorescence imaging and magnetic manipulation. *Advanced Materials*, 20(23): 4403–4407.

Keil A.J., Stewart G., Ryan S. et al. (2008) Vancomycin-modified nanoparticles for efficient targeting and preconcentration of Gram-positive and Gram-negative bacteria. *ACS Nano*, 2(9): 1777–1788.

Kim H., Achermann M., Balet L.P. et al. (2005) Synthesis and characterization of Co/CdSe core/shell nanocomposites: bifunctional magnetic-optical nanoparticles. *J. Am. Chem. Soc.*, 127(2): 544–546.

Kim J., Lee J.E., Lee S.H. et al. (2008) Designed fabrication of a multifunctional polymer nanomedical platform for simultaneous cancer-targeted imaging and magnetically guided drug delivery. *Advanced Materials*, 20(3): 478–483.

Lee H., Dellatore S.M., Miller W.M., Messersmith P.B. (2007) Mussel-inspired surface chemistry for multifunctional coatings. *Science*, 318(5849): 426–430.

Leroux J.C. (2007) Injectable nanocarriers for biodegradation. *Nat. Nanotechnol.*, 2(11): 679–684.

Michalet X., Pinaud F.F., Bentolila L.A. et al. (2005) Quantum dots for live cells, in vivo imaging, and diagnostics. *Science*, 307(5709): 538–544.

Neuberger T., Schöpf B., Hofmann H. et al. (2005) Superparamagnetic nanoparticles for biomedical applications: possibilities and limitations of a new drug delivery system. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 293(1): 483–496.

Park J., Joo J., Kwon S.G. et al. (2007) Synthesis of monodisperse spherical nanocrystals. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 46(25): 4630–4660.

Peng S., Sun S. (2007) Synthesis and characterization of monodisperse hollow Fe₃O₄ nanoparticles. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 46(22): 4155–4158.

Safarik I., Safarikova M. (2004) Magnetic techniques for the isolation and purification of proteins and peptides. *Biomagn. Res. Technol.*, 2(1): 7.

Selvan S.T., Patra P.K., Ang C.Y., Ying J.Y. (2007) Synthesis of silica-coated semiconductor and magnetic quantum dots and their use in the imaging of live cells. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 46(14): 2448–2452.

Skrabalak S.E., Chen J., Sun Y. et al. (2008) Gold nanocages: synthesis, properties, and applications. *Acc. Chem. Res.*, 41(12): 1587–1595.

Sun S. (2006) Recent advances in chemical synthesis, self-assembly, and applications of FePt nanoparticles. *Advanced Materials*, 18: 393–403.

Wang L., Yang Z., Gao J. et al. (2006) A biocompatible method of decoloration: bisphosphonate-modified magnetite nanoparticles to remove uranyl ions from blood. *J. Am. Chem. Soc.*, 128(41): 13358–13359.

Whitesides G.M. (2003) The 'right' size in nanobiotechnology. *Nat. Biotechnol.*, 21(10): 1161–1165.

Xu C., Xie J., Ho D. et al. (2008) Au-Fe₃O₄ dumbbell nanoparticles as dual-functional probes. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 47(1): 173–176.

Yin Y., Rioux R.M., Erdonmez C.K. (2004) Formation of hollow nanocrystals through the nanoscale Kirkendall effect. *Science*, 304(5671): 711–714.

Yu H., Chen M., Rice P.M. et al. (2005) Dumbbell-like bifunctional Au-Fe₃O₄ nanoparticles. *Nano Lett.*, 5(2): 379–382.

Полифункціональні магнітні наночастиці: застосування в медицині

І.С. Чекман, Н.А. Горчакова, А.О. Сырова, О.О. Митюшова

Резюме. Обобщены физико-химические, фармакологические и токсикологические свойства магнитных наночастиц (железа оксида, урана бифосфоната, наноконструктов железа с серебром, золотом, кадмием и других наночастиц), методы их применения. Описаны механизмы действия магнитных наночастиц на организм человека. Показана сфера возможного их применения в медицине — для идентификации бактерий, очистки белка, в виде контрастных веществ и лекарственных средств.

Ключевые слова: полифункціональні магнітні наночастиці, методи синтезу, застосування в медицині, заліза оксид, урана бифосфонат.

Multifunctional magnetic nanoparticles: application in medicine

I.S. Chekman, N.A. Gorchakova, G.O. Syrova, O.O. Mitushova

Summary. Physicochemical, pharmacological and toxicological properties of magnetic nanoparticles (iron oxide, uranium bisphosphonate, nanocomposites of iron with silver, gold, cadmium and other nanoparticles) and methods of their synthesis are generalized in the article. Mechanisms of the magnetic nanoparticles influence on human organism are described. Areas of their possible application in medicine are shown including bacteria identification, protein purification as well as like contrast substances and drugs.

Keywords: multifunctional magnetic nanoparticles, methods of synthesis, application in medicine, iron oxide, uranium bisphosphonate.

Адреса для листування:

Чекман Іван Сергійович
 03057, Київ, просп. Перемоги, 34
 Національний медичний університет ім. О.О. Богомольця, кафедра фармакології та клінічної фармакології
 E-mail: chekman_ivan@yahoo.co.uk