

PACSnumbers: 68.37.Lp, 75.50.Tt, 75.60.-d, 75.75.Cd, 81.70.Pg, 82.30.Lp, 87.19.xj, 87.85.Rs

## **Поліфункціональні магнеточутливі наноструктури та матеріали: сучасний стан і перспективи досліджень**

П. П. Горбик, С. М. Махно, А. П. Кусяк, Р. В. Мазуренко,  
О. М. Лісова, С. Л. Прокопенко, І. В. Дубровін, С. П. Туранська,  
А. Л. Петрановська, О. М. Щеглов

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

Проаналізовано й узагальнено результати авторських досліджень в рамках нового міждисциплінарного науково-практичного напрямку «Поліфункціональні магнеточутливі наноструктури та матеріали», що охоплює широке коло актуальних сучасних проблем хемії, фізики, медицини (зокрема онкології), фотофармакології, біології, екології, техніки тощо. Розглянуто приклади розробок, перспективних для практичного використання, пов'язаних з: хемічним конструюванням багаторівневих наноконструкцій типу ядро–оболонка з функціями медично-біологічних нанороботів; створенням нового покоління магнетних адсорбентів з різною природою поверхні медичного, технічного, технологічного й екологічного призначення; розвитком нанотехнологічної бази малоінвазивних методів фотодинамічної протипухлинної терапії та неінвазивного керованого фармакологічного впливу заданого напрямку на біологічні клітинні системи; синтезом нових магнетних рідин на основі фізіологічного розчину, що містять магнеточутливі багаторівневі поліфункціональні наноконструкції з актуальними протипухлинними лікарськими препаратами й антитілами. Показано перспективність нових ефективних захисних матеріалів, здатних вбирати електромагнетне випромінювання (ЕМВ) в заданих діапазонах спектру для використання в: електроніці й у боротьбі з електромагнетним смогом; створенні покриттів, активних в інфрачервоному (ІЧ) та надвисокочастотному (НВЧ) діапазонах спектру. Широкопasmове вбирання та пропускання в цьому випадку є важливими чинниками, що визначають експлуатаційну придатність матеріалів.

The results of the authors' research within the new interdisciplinary scientific and practical direction 'Polyfunctional magnetically sensitive nanostructures and materials', covering a wide range of topical modern problems of chemistry, physics, medicine (including oncology), photo-

pharmacology, biology, ecology, engineering, *etc.* are analysed and summarized. Achievements are summarized, and directions of development of scientific approach in the field of creation of the molecular and nanoscale objects with predefined properties are analysed. Examples of promising developments for practical use related to the chemical design of multilevel core-shell nanocomposites with the functions of biomedical nanorobots, which can move independently along different trajectories, be controlled by external fields, and interact with objects and the environment, are considered. The article presents the creation of a new generation of magnetic adsorbents with different surface properties for medical, technical, and environmental purposes, the development of a nanotechnological basis for non-invasive photopharmacological methods of anticancer therapy, and controlled pharmacological effects of a given direction on biological cellular systems. Considerable attention is paid to the synthesis of new magnetic fluids based on saline solution containing magnetically sensitive multilevel polyfunctional nanocomposites, which allow the transportation and retention of nanoscale magnetically sensitive drug carriers in the vessels of various types of the circulatory system using an external magnetic field, with topical anticancer drugs and antibodies. The prospect of new effective protective materials capable of absorbing electromagnetic (EM) radiation in specific ranges of the electromagnetic spectrum for use in high-tech electronics and protection against electromagnetic pollution, the creation of scientific foundations of protective coatings active in the infrared (IR) and ultrahigh frequency (UHF) ranges of the spectrum, are shown. The advantages of protective materials containing magnetic, dielectric and electrically conducting components, and core-shell nanocomposites include reduction of reflection coefficients, optimization of loss and impedance coherence with open space, and wideband absorption. These important factors determining the serviceability of the materials, as well as general technical factors such as mass-dimensional characteristics and corrosion resistance, and point to the prospects for unique technical applications, particularly in the field of creating new types of surfaces and coatings with defined electrodynamic properties.

**Ключові слова:** наноструктура, нанокомпозит ядро-оболонка, функції наноробота, магнетний адсорбент, магнетна рідина, взаємодія з електромагнетним опроміненням, протипухлинна терапія, фотофармакологія.

**Key words:** nanostructure, core-shell nanocomposite, functions of nanorobot, magnetic adsorbent, magnetic fluid, interaction with electromagnetic radiation, antitumor therapy, photopharmacology.

*(Отримано 6 лютого 2025 р.)*

## 1. ВСТУП

На початку ХХІ століття набула актуальності проблема створення молекулярних і нанорозмірних структур, що за своїми функціональними можливостями визначались як молекулярні маши-

ни, наномотори, нанороботи тощо, здатні здійснювати запрограмований комплекс корисних дій, наприклад, хемічного, технологічного, біологічного чи то медичного характеру на атомарному, молекулярному та генному рівнях [1–7]. На ранніх етапах досліджень і пошуку шляхів її розв'язання значне місце відводилося встановленню наукових принципів функціонування вказаних молекулярних і нанорозмірних об'єктів, а також перспективних способів забезпечення їхніх контрольованих механічних переміщень, зокрема у біологічних середовищах. Для конструювання біологічних нанороботів, молекулярних моторів і машин використовували фрагменти молекул ДНК, м'язові нановолокна [2, 3], кільцеподібні біомолекули, «нанізані» на лінійний «місток» із амінокислот [4, 5], фотозбуджені та метастабільні стани наночастинок, асиметричний розподіл електричних полів у напрямку їхнього руху, флюктуаційні процеси молекулярної й електричної природи [6, 7].

Виходячи з літературних даних, наведені проблеми залишаються актуальними і на цей час.

Так, у роботі [8] проаналізовано рух каталітичних Au/Pt-мікромоторів у пероксидному паливному середовищі за ефекту впливу поверхневих акустичних хвиль (SAW). Досліджено зміну швидкості мікромотора, залежно від типу й інтенсивності SAW. Стратегія авторів базувалася на використанні одноланцюгових ДНК-зондів, іммобілізованих до Au/Pt-мікромоторів, які розпізнають цільову мікроРНК-21 як біомаркера, пов'язаного з раком.

В роботі [9] повідомляється про дизайн, синтезу та функціональне тестування пористих саморухомих мікромоторів, виготовлених із металоорганічної каркасної основи (MOF), які працюють на ферментах і в майбутньому можуть бути перспективними для адресного доставляння лікарських засобів, сорбції, каталітичних застосувань тощо. Кластери  $Zr_6O_4(OH)_4$  з 1,4-бензодикарбоновою кислотою (UiO-66), як представник сімейства MOF у структурі мікромоторів, широко застосовуються в сенсориці, зв'язуванні та вивільненні лікарських засобів, розподілі, накопиченні й адсорбції речовин завдяки своїй великій внутрішній площі поверхні, однорідному розміру пор, порівняно легкій функціоналізації та винятковій стабільності.

В оглядах [10, 11] підсумовано досягнення та проаналізовано напрями розвитку наукових підходів у галузі створення нанороботів з розширеними можливостями, які можуть виконувати різні завдання та були в центрі значних дослідницьких інтересів. Нанороботи можуть самостійно рухатися різними траєкторіями, керуватися за допомогою зовнішніх полів і взаємодіяти з об'єктами та навколишнім середовищем. В останні роки фізичні та хемічні методи виготовлення їх, зокрема з використанням самоо-

рганізації, знаходилися в основі реалізації певних корисних функцій. Сьогодні конвергенція між біомедичними наночастинками та нанороботами стала очевидною. Тому, як пріоритетний напрям, обговорюють можливості створення наступних поколінь нанороботів, технології виготовлення їх і функції для біозастосувань. Значну увагу приділяють дизайну нанороботів, щоб полегшити впровадження їх у клінічну практику та повністю розкрити потенціал у біомедичних дослідженнях й охороні здоров'я.

Слід зауважити, що практичне застосування зазначених нанота молекулярних саморухомих структур з метою, наприклад, спрямованого транспортування лікарських засобів або виконання інших корисних функцій, до цього часу залишається доволі проблематичним, а дослідження їх мають лабораторний, доклінічний характер.

Тому науковий і практичний інтерес має альтернативний нанохемічний підхід, використаний у роботі [12], в якій синтезовано та досліджено магнетні наночастинки (НЧ)  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , інкапсульовані тонкою кремнеземною оболонкою, яку функціоналізували флуоресцентними барвниками та групами LH–RH для біотаргетування на специфічні рецептори ракових клітин. Такі ієрархічно побудовані наночастинки, визначені як «наноклініки», характеризувалися можливостями підвищувати контраст магнетно-резонансної й оптичної візуалізації в дослідженнях біологічних ефектів, а також здійснювати прицільну локальну магнетоіндуковану терапію раку. Структура та функції наноклінік охарактеризовано методами електронної та рентгенівської дифракції, трансмісійної електронної мікроскопії, атомно-силової та сканувальної електронної мікроскопії, двофотонної лазерної сканувальної мікроскопії. Таким чином, за допомогою магнетних наноклінік було продемонстровано новий актуальний механізм вибіркового знищення ракових клітин.

Наведений нанохемічний підхід [12] набув успішного розвитку за реалізації та практичної апробації концепції нанокомпозитів (НК) типу ядро–оболонка з функціями медично-біологічних нанороботів [13–23]: розпізнавання мікробіологічних об'єктів у біологічних середовищах, адресного доставляння лікарських препаратів до клітин- та органів-мішеней і депонування, комплексної локальної хеміо-, імуно-, нейтронзахоплювальної, гіпертермічної, фотодинамічної терапії та діагностики в режимі реального часу, детоксикації організму шляхом адсорбції токсинів, вірусних частинок, йонів важких металів тощо та видалення їх за допомогою зовнішнього магнетного поля.

Здійснення системних досліджень у вказаному напрямі потребувало постановки цілеспрямованих комплексних експериментальних робіт, а також теоретичних оцінок, аналізів та узагаль-

нень. Інтерес до вказаної тематики ще більше підвищився після виявлення ефекту синергійного підсилення фармакологічної дії офіційних протипухлинних препаратів за участю біосумісних наночастинок магнетиту, які в самостійному використанні помітної цитотоксичності не виявляють, а також явища широкосмугового вбирання надвисокочастотного електромагнетного випромінення середовищами, що містять НК з діелектричними, магнетними та провідними втратами. Останнє прямо вказувало на перспективи унікальних технічних застосувань, зокрема в галузі створення нових типів поверхонь і покриттів із заданими електродинамічними властивостями.

Таким чином, наведені обставини сприяли виникненню нового міждисциплінарного науково-практичного напрямку «Поліфункціональні магнеточутливі матеріали та наноструктури», який на цей час охоплює широке коло сучасних актуальних проблем хемії, фізики, медицини (зокрема онкології), оптофармакології, біології, екології, техніки тощо. Тому метою цієї роботи є огляд, аналіз та узагальнення результатів авторських експериментальних і теоретичних досліджень, спрямованих на наукове обґрунтування та створення широкого покоління новітніх практично важливих поліфункціональних магнеточутливих наноструктурних матеріалів.

## **2. ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНІ НАНОКОМПОЗИТИ БІОМЕДИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

Реалізація завдання створення поліфункціональних НК для використання в біомедичних галузях потребує розробки підходів щодо синтезу нових наносистем високого ступеня складності, які мають забезпечити строгу послідовність виконання унікальних дій в організмі людини, спрямованих на досягнення терапевтичного результату. Водночас умови синтезу мають не призводити до втрат магнетних властивостей і біоактивності компонентів НК, а їхній хемічний склад має не викликати додаткового токсикоалергічного навантаження на організм. Магнетні властивості НК мають відповідати умовам успішної доставки лікарських засобів до біологічних мішеней і не створювати процеси неконтрольованої оклюзії судин, емболії тощо.

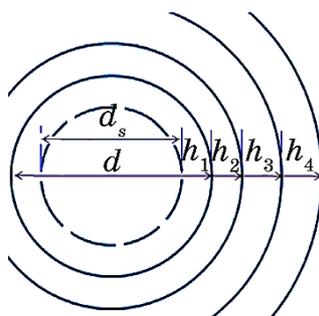
Вирішенню поставлених завдань присвячено експериментальні [13–18] та теоретичні [15, 18–20, 24] дослідження на початкових етапах роботи. Зокрема, теоретична аналіз умов транспортування й утримання нанорозмірних магнеточутливих носіїв лікарських засобів у судинах різних типів кровоносної системи за використання зовнішнього магнетного поля уможливила одержати критерій успішної доставки їх до органу-мішені, оцінити область

значень напружености та ґрадієнту поля, встановити зв'язки розмірних параметрів судин з характеристиками кровотоку та зони активної дії поля тощо. Результати розрахунків можуть бути корисними під час створення оптимальних магнетних систем для практичної реалізації магнетокерованого адресного доправлення ліків до терапевтичної мішені.

## 2.1. Хемічне конструювання нанокомпозитів з функціями нанороботів

Схему хемічного конструювання багаторівневої ієрархічної наноархітектури магнеточутливих НК із функціями нанороботів, згідно зі сформульованою вище концепцією, на сьогодні експериментально відпрацьовано за всіма основними хемічними та технологічними етапами, реалізовано та всебічно перевірено на виконання функцій щодо медично-біологічних застосувань [18, 20, 24, 25]. Побудовано структурний модель поліфункціонального НК (рис. 1), здійснено математичний опис його магнетних властивостей, який задовільно узгоджується з результатами комплексних експериментальних досліджень [26–28].

Першим ієрархічним рівнем НК, його ядром, є вихідний матеріал для подальшого хемічного конструювання наноархітектури — суперпарамагнетна однодоменна НЧ діаметром  $d = d_s + 2h_1$ . У цьому моделі (рис. 1) ядро виконує функції магнеточутливого носія лікарських засобів до органів- і клітин-мішеней, перетворювача енергії високочастотного магнетного поля зовнішнього джерела на теплову енергію з метою створення гіпертермічних зон,



**Рис. 1.** Структурний модель НК типу ядро–багаторівнева оболонка. Позначено:  $d$  — діаметер сферичної НЧ магнетика (ядро);  $d_s$  — діаметер магнетика з намагнетованістю наситу, характерною для об'ємного матеріалу ядра;  $h_1$  — товщина приповерхневого «знемагнетованого» шару магнетика;  $h_2, h_3, h_4$  — товщина шару модифікатора, лікарського препарату та капсули (стабілізатора) відповідно в структурі оболонки.<sup>1</sup>

реакційноздатної поверхні, що дає змогу реалізувати подальший дизайн багаторівневої шаруватої оболонки НК, засіб контрастування в МРТ-діагностиці тощо [6, 14]. Встановлено, що приповерхневий шар НЧ товщиною  $h_1$  за порядком величини сумірний із постійною кристалічної ґратниці речовини ядра і є «знемагнетованим» (або «слабомагнетним») внаслідок структурних порушень.

Отже, ядро в структурі нанокомпозиту виконує кілька важливих функцій; тому від його вибору й оптимізації в значній мірі залежить успіх побудови всієї багаторівневої ієрархічної наноархітектури.

Вибір і синтез магнеточутливих ядер поліфункціональних НК для медично-біологічних застосувань, які виконують роль носія лікарських засобів, є окремим актуальним завданням, що потребує всебічного наукового обґрунтування. Тому нами розроблено методики синтезу різних типів перспективних магнеточутливих наноматеріалів і вивчено їхні властивості: нанорозмірних металевих частинок Fe [25], Co [15], Ni [15, 30–32], однодоменних феритів  $Fe_3O_4$  [33–35],  $MnFe_2O_4$  [36],  $NiFe_2O_4$  [37],  $CoFe_2O_4$  [38],  $GdFe_2O_4$  [39], твердих розчинів у системах  $(Fe_{1-x}Mn_x)Fe_2O_4$  [36],  $(Fe_{1-x}Ni_x)Fe_2O_4$  [37],  $(Fe_{1-x}Co_x)Fe_2O_4$  [38],  $(Fe_{1-x}Zn_x)Fe_2O_4$  [40] тощо. Змінюючи їхній тип і варіюючи хемічний склад можна задовольнити багатьом вимогам, що виникають під час створення НК із заданим комплексом властивостей.

На цей час серед відомих типів магнетних біосумісних речовин широкого застосування, зокрема для синтезу композитних наноструктур, набув магнетит ( $Fe_3O_4$ ), який має біогенну природу. Способи виготовлення й унікальні властивості  $Fe_3O_4$  добре вивчено (за нормальних умов розмірна область суперпарамагнетного стану й абсолютної однодоменності складає 3–23 нм) [22].

Оболонка поліфункціонального НК формується навколо його ядра (рис. 1), має складну будову, в якій можна виділити три шари товщиною  $h_2$ ,  $h_3$ ,  $h_4$  відповідно. Ці шари послідовно утворюються в процесі синтезу НК з метою виконання ним заданих функцій. Зазначимо, що поділ оболонки на кількість шарів має умовний характер і визначається особливостями функціонального призначення НК.

Так, оболонка містить *другий ієрархічний рівень* НК ( $h_2$ ), який створюється хемічним модифікуванням поверхні вихідної магнетної наночастинки покриттям (в експериментах використовували  $\gamma$ -аміно-пропілсилоксан ( $\gamma$ -АПС), мезо-2,3-димеркаптосукцинову кислоту (ДМСК), діетилентриамінпентауксусну кислоту (ДТПК), цитрат Натрію, гідроксиапатит (ГА), оксид Силіцію, оксид Титану, оксид Алюмінію, поліакриламід (ПАА) тощо) [15, 18, 22, 25, 41]. Модифікатор стабілізує ядро в біологічному середовищі, зберігає

його високу питому поверхню, підвищує біосумісність і забезпечує необхідну хемічну функціоналізацію для наступної біофункціоналізації НК. Товщина модифікатора  $h_2$  становить 1–2 нм в залежності від його призначення, хемічної природи та розміру ядра.

Біофункціоналізація наноконструктури відбувається на *третьому рівні* ( $h_3$ ) ієрархічної наноструктури шляхом іммобілізації хеміо-, імуно-, радіотерапевтичних нейтронзахоплювальних і діагностичних препаратів, а також сенсорів (антитіл), що розпізнають специфічні мікробіологічні об'єкти [15, 19, 22, 25, 41]. Оскільки сумісна іммобілізація різних типів лікарських засобів не завжди є можливою, тому шар, що містить їх ( $h_3$ , рис. 1) формується в певній послідовності; його товщина становить 1–3 нм. Для біофункціоналізації НК використовували актуальні сучасні протипухлинні засоби за механізмами: хеміотерапії (цисплатин (ЦП), доксорубіцин (ДР), гемцитабін (ГЦ)), імунотерапії (антитіла (АТ) CD-95, HER2, імуноглобуліни), радіологічної нейтронзахоплювальної терапії (карборан (КБ), В-, Gd-вмісні сполуки), фотодинамічної (індоціанінові барвники, ацетонітрил, діізопропіламін) та фототермальної (наночастинки Au, Ag) терапії тощо.

Зазначимо, що дослідження синтезованих НК на основі протипухлинних препаратів, їхньої біоактивності *in vitro* й *in vivo*, створених моделей нових перспективних магнеточутливих онкологічних лікарських засобів виконано спільно з ІЕПОР ім. Р. Є. Кавецького НАН України.

Реалізація лікувальних функцій здійснюється шляхом вивільнення біоактивних складових з оболонкової структури НК або дією на терапевтичну мішень комплексів, утворених біоактивними препаратами із залізовмісним нанорозмірним носієм, який також виконує важливу й активну роль у біохемічних процесах на клітинному рівні [42, 43]. Численними дослідженнями експериментально встановлено важливу особливість НК з функціями нанороботів: синергізм дії його біологічно активних складових на терапевтичну мішень.

Функції *четвертого ієрархічного рівня* ( $h_4$ , рис. 1) пов'язані з капсулюванням НК і полягають у збереженні їхніх властивостей і пролонгації дії. Наноканулювання здійснюють декстраном, желатином, полівініловим спиртом, полівінілпіролідом [15, 18, 22].

### 2.1.1. Магнеточутливі наноконструктури для комплексної локальної терапії

З метою створення новітніх магнеточутливих протипухлинних лікарських засобів, здатних розпізнавати специфічні клітини та виконувати комплекс хеміо-, імуно-, гіпертермічних терапевтич-

них і діагностичних функцій на тканинному та клітинному рівнях, синтезовано зразки НК типу ядро-багаторівнева оболонка, які містили в структурі залізовмісного ядра йони Гадолінію, а оболонки — іммобілізований протипухлинний хеміотерапевтичний препарат (ЦП, ДР, ГЦ), моноклональне АТ CD 95, АТ HER2 [14–25, 42, 43] тощо.

Експериментально відпрацьовано та підтверджено основні функціональні можливості НК: кероване доставляння до пухлин, утримування за допомогою градієнтного постійного зовнішнього магнетного поля, пролонговане вивільнення лікарських препаратів різних механізмів дії, розпізнавання пухлинних клітин і здійснення локальної хеміо- й імунотерапії.

Додатковими можливостями синтезованих НК є створення гіпертермічного ефекту за допомогою змінного зовнішнього магнетного поля та здійснення МРТ-діягностики в  $T_1$ -,  $T_2$ -режимах реального часу.

На основі досліджених НК створено нові моделі вітчизняних онкологічних лікарських засобів з підвищеною ефективністю та здійснено необхідні фізико-хемічні та біологічні (*in vitro*, *in vivo*) дослідження [44–55].

Синергійна сумісна дія на пухлинні клітини залізовмісного носія, хеміотерапевтичного препарату й антитіла за ефективністю на 50–100% перевершувала дію відповідних лікарських засобів в індивідуальному використанні препаратів у тих же дозах [17]. Виявлений синергійний цитотоксичний/цитостатичний ефект пояснено високою біологічною активністю комплексу магнетиту з хеміотерапевтичним лікарським препаратом й антитілом внаслідок розпізнавання рецепторів пухлинних клітин антитілом і фармакологічної корекції обміну ендогенного заліза [43, 56]. Як приклад, в табл. 1 наведено результати дослідження впливу магнеточутливих НК з адсорбованим ЦП, кон'югованих моноклональними антитілами CD 95, на життєздатність клітин лінії MCF-7 [14, 17].

Так, встановлено, що в механізмах реалізації програми апоптозу внаслідок формування медикаментозного впливу НК істотну роль відіграють порушення обміну ендогенного заліза в онкоклітинах. Вказані порушення викликають підвищену потребу клітин у залізі, яка задовольняється накопиченням значної кількості НЧ  $Fe_3O_4$ . Високий рівень «вільного заліза» у формі накопиченого  $Fe_3O_4$  та кислого середовища в клітинах зумовлює пришвидшене утворення йонів Феруму й активних форм Оксигену (Фентонова реакція), що, в свою чергу, призводить до оксидативного стресу клітин і апоптозу. Водночас відбувається також підсилення ефективності дії як хеміотерапевтичного препарату, так і антитіла.

**ТАБЛИЦЯ 1.** Вплив магнеточутливих НК з адсорбованим ЦП, кон'югованих моноклональними антитілами CD 95, на життєздатність клітин лінії MCF-7 [14, 17].<sup>2</sup>

Контроль порівняння	Кількість загиблих клітин, %						
	Дія контролю	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /+ ЦП	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /+ CD 95	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /+ ЦП + CD 95	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /γ-АПС + ЦП	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /γ-АПС + CD 95	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /γ-АПС + ЦП + CD 95
ЦП, 2,5 мкг/мл	25	34	—	—	31	—	—
CD 95, 0,2 мкг/мл	10	—	25	—	—	20	—
ЦП + CD 95	40	—	—	46	—	—	46
ЦП, 2,5 мкг/мл	25	38	—	—	48	—	—
CD 95, 0,2 мкг/мл	10	—	21	—	—	27	—
ЦП + CD 95	40	—	—	57	—	—	57

### 2.1.2. Магнеточутливі наноконкомпозити для нейтронзахоплювальної терапії

Розробка наукових підходів до вирішення проблеми впровадження магнетокерованих поліфункціональних В- й Gd-вмісних НК у нейтронзахоплювальну терапію (НЗТ) є актуальним завданням, оскільки вони можуть стати основою для створення нових типів малотоксичних селективних радіологічних лікарських засобів із додатковими функціями магнетокерованого спрямованого доставляння до органів- або клітин-мішеней і депонування хеміо- й імунотерапевтичних препаратів, гіпертермії та комбінованої T<sub>1</sub>-, T<sub>2</sub>-МРТ-діягностики у режимі реального часу.

В роботах [18, 21, 24, 25, 33, 39, 47, 49, 55, 57, 58] розроблено методики синтези та досліджено властивості НК на основі однодоменного магнетиту для НЗТ, зокрема:

- 1) Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/γ-АПС/ДТПК/Gd — ковалентною іммобілізацією на поверхні Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, модифікованій γ-АПС, ДТПК у комплексах з йонами Gd<sup>3+</sup>;
- 2) Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/ДМСК/Gd — модифікуванням поверхні магнетиту ДМСК, до карбоксильних і сульфогідрильних функціональних груп якої

приєднано йони  $Gd^{3+}$ ;

3)  $Fe_3O_4$ /ДМСК/КБ — модифікуванням поверхні магнетиту ДМСК з подальшою функціоналізацією орто-тіокарбораном за реакцією тіол-дисульфідного обміну;

4)  $Fe_3O_4$ /GdBO<sub>3</sub> — модифікуванням поверхні магнетиту боратом Гадолінію GdBO<sub>3</sub>, що утворюється в результаті взаємодії йонів  $Gd^{3+}$  із гідратованими аніонами Бору  $[B_4O_5(OH)_4]^-$  з подальшою гідролізою до GdBO<sub>3</sub>; НК цього типу одночасно містять Бор і Гадоліній, можуть поєднувати функції неорганічного сцинтилятора та нейтронзахоплювального агента.

НК синтезовано з компонентів, що характеризуються задовільною біосумісністю. Їхню будову та властивості вивчено комплексом фізико-хімічних методів.

### 2.1.3. Нанокompозити для фотодинамічної терапії

З метою створення перспективних для використання в фотодинамічній терапії (ФДТ) нових магнето-чутливих поліфункціональних лікарських засобів синтезовано НК типу ядро-оболонка з багаторівневою ієрархічною наноархітектурою та функціями медично-біологічних нанороботів, що містять магнетит із модифікованою димеркаптосукциновою кислотою поверхнею, іммобілізовані індоціанінові барвники (ІБ3207, ІБ3428, виготовлені в Інституті органічної хімії НАН України Сломінським Ю. Л.) та досліджено їхні флюоресцентні властивості [25].

Як розчинник використовували ацетонітрил, а каталізатором реакції взаємодії барвника та композиту  $Fe_3O_4$ /ДМСК слугував діізопропіламін.

Про приєднання барвника ІБ3207 до поверхні НК  $Fe_3O_4$ /ДМСК свідчили наявні смуги вбирання в інтервалі 3220–3560  $cm^{-1}$  інфрачервоних Фур'є-спектрів НК  $Fe_3O_4$ /ДМСК/ІБ3207, які можна віднести до валентних коливань ОН-груп ІБ3207, а також спектри дифузного відбивання НК  $Fe_3O_4$ /ДМСК/ІБ3207 у видимій області, а саме, наявність характерної для ІБ3207 смуги вбирання при 690 нм.

Також експериментально було встановлено, що у НК  $Fe_3O_4$ /ДМСК/ІБ3207 спостерігається явище фотолюмінесценції: за довжини хвилі збудження у 514,5 нм в області 775–850 нм відбувається інтенсивне випромінювання, пов'язане з активністю індоціанінового барвника.

Одержані дані свідчать про перспективність досліджень з метою практичного застосування НК  $Fe_3O_4$ /ДМСК/ІБ3207 для ФДТ, здатних до флюоресценції у близькій інфрачервоній області спектру, з додатковими функціями адресного доставляння, гіпертермії, контрастування під час МРТ-діягностики тощо.

### 3. НАНОКОМПОЗИТИ ДЛЯ МАГНЕТОЧУТЛИВИХ АДСОРБЦІЙНИХ МАТЕРІЯЛІВ

*Наноконпозити для біомагнетних імуноадсорбентів.* Проведено дослідження з метою вирішення актуальної проблеми створення біомагнетних адсорбентів, здатних видаляти вірусні частинки гепатиту з біологічних рідин, зокрема з плазми та сироватки крові людини [15, 19, 24, 25]. Роботи було виконано спільно з фахівцями Інституту гематології та трансфузіології НАМН України. Біомагнетний адсорбент одержували модифікуванням золь-гель-методом поверхні нанодисперсного магнетиту силіка- $\gamma$ -амінопропілсилоксаном з наступною іммобілізацією відповідних імуноглобулінів (детально експериментальні методики наведено в [24, 25]). На цій основі було синтезовано зразки, специфічні щодо вірусів гепатитів В і С, здатні до ефективного видалення вказаних інфекційних вірусів із продуктів донорської крові людини. Однак повної вірусної інактивації рідин не було досягнуто. Дослідженнями встановлено, що це пов'язане з наявністю незначної залишкової кількості вірулентних дефектних (мутованих) інфекційних вірусних частинок, які не розпізнавалися антитілом, що унеможливило здійснити повну деконтамінацію їх.

*Наноконпозити для адсорбентів медичного, технічного, технологічного й екологічного призначення.* Зразки магнетиту та НК з поверхнями різної хемічної природи ( $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ГА}$  (ГА — гідроксиапатит),  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\gamma\text{-АПС}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ДМСК}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ПАА}$  (ПАА — поліакриламід),  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}$ ) були використані для досліджень адсорбції ЦП, ДР і ГЦ.

Біосумісність, задовільні магнетні властивості й адсорбційні параметри досліджених НК по відношенню до вказаних хеміотерапевтичних препаратів, йонів Феруму, Плюмбуму, Купруму, Кадмію, Цинку, Гадолінію, Аргентуму, Ауруму тощо, зокрема за їхніх малих концентрацій, можливість використання в рідких середовищах, в тому числі біологічних, свідчать про перспективність застосування їх в якості адсорбентів медично-біологічного, технічного, технологічного й екологічного призначення [15, 18, 24, 25, 47–52, 59–63].

### 4. ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНІ НАНОКОМПОЗИТИ ДЛЯ ФОТОФАРМАКОЛОГІЇ

Аналіза огляду наукової літератури й інтернет-джерел свідчить, що ключовою проблемою сучасної клінічної фармакології є відсутність достатньої специфічності й істотні побічні ефекти більшості ліків, особливо тих, терапевтична дія яких має бути строго обмеженою тими чи іншими внутрішніми ділянками організ-

му, тканинами або групами клітин. Для вирішення цієї проблеми пропонується поєднання світлочутливих форм біологічно активних сполук із наночастинками, які здатні перевипромінювати кванти видимого світла у відповідь на вбирання квантів високопроникного випромінення, зокрема, Рентгенового. Вважається, що така стратегія потенційно дасть змогу вивільнити будь-який тип біологічно активної сполуки, для якої створено світлочутливу, біологічно інертну форму, у будь-якому вибраному місці організму та в будь-який вибраний час, продиктований виключно терапевтичними показаннями, без значних побічних ефектів. Наведена стратегія, по суті, складає ідейну основу фотофармакології (за деякими джерелами — оптофармакології).

В минулому десятилітті фотофармакологія фактично відкрила нову методологічну еру в нейробиології. Зокрема, створено сучасний потужний комплекс методів і підходів, що уможливує здійснювати різнобічний і селективний моніторинг і контроль нейронної активності.

В наш час особливої актуальності набувають дослідження головного мозку як комплексу тісно взаємопов'язаних розподілених нейронних мереж, взаємодії яких становлять головну суть його функцій. Сучасна наука про мозок потребує ефективного експериментального вивчення подібних складних функціональних систем, зокрема шляхом аналізу роботи нейронних мереж за допомогою вибіркового керування функціями складових їхніх нейронів.

Однак загально визнано, що актуальними залишаються проблеми створення нових ефективних фотофармакологічних засобів спрямованого впливу на клітинному рівні, їхньої токсичності та стабільності, розробки сенсорних систем, інтерпретації результатів тощо.

Виходячи з наведених даних, можна стверджувати, що актуальними завданнями сучасної фотофармакології з фундаментальної та прикладної точок зору, дотичних до хемічної науки, є створення нанотехнологій виготовлення фоточутливих наноструктур з керованою біоактивністю, розробка методів адресного доставлення фотофармакологічного засобу до терапевтичної мішені, контролю в реальному часі за його переміщенням, локалізацією, накопиченням дози тощо.

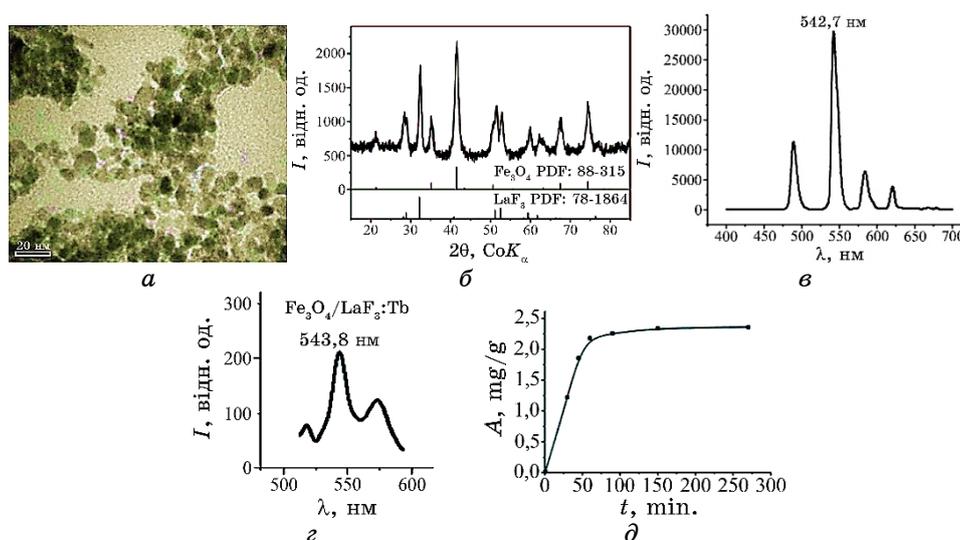
Тому в минулі три роки в Інституті хімії поверхні ім. О. О. Чуйка НАН України спільно з Інститутом фізіології ім. О. О. Богомольця НАН України розпочато дослідження в новому науково-практичному напрямі, що поєднує концепцію магнеточутливих багаторівневих НК з функціями нанороботів зі стратегією фотофармакології, що дасть можливість реалізувати їхні переваги в одній розробці [41, 64–69]. Такий підхід забезпечить розвиток нанотехнологічної бази вітчизняної методології малоінвазивної протипух-

линної терапії та керованого впливу на біологічні клітинні системи, перспективної для практичного впровадження.

Головна суть спільних досліджень — розробка діючого моделю контрольованого доставляння фотофармакологічного засобу в будь-яку ділянку організму за допомогою магнетного поля для створення неінвазивного впливу заданого напрямку на нейронні або пухлинні клітинні системи.

Для створення біоактивного наноконкомплексу, дія якого включається високопроникним Рентгеновим випроміненням, розроблено методику синтезу й одержано рентгеноодноразні нанодисперсні рентгенолюмінофори на основі фториду та фосфату Лантану, активованих Тербієм. Вивчено ТЕМ-зображення НЧ  $\text{LaF}_3:\text{Tb}$  з модифікованою цитратом Натрію поверхнею ( $\text{LaF}_3:\text{Tb}/\text{Citr}$ ), їхні фазовий склад, розподіл за розмірами, рентгенолюмінесценцію, адсорбцію модельної fotocутливої речовини — рутеній-біпіридин-нікотину ( $\text{RuBiNik}$ ), яка за дії люмінесцентного випромінення в діпазоні 530–550 нм вивільнює біоактивну молекулу нікотину з прийнятним квантовим виходом.

Синтезовано та досліджено магнеточутливі рентгенолюмінесцентні НК магнетит-фторид Лантану, перспективні для контрольованого адресного доставляння fotocутливого фармакологічного препарату та фіксації його в організмі (рис. 2).



**Рис. 2.** ТЕМ-зображення (а, масштаб 20 нм) та рентгенодифрактограма (б) НК  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{LaF}_3:\text{Tb}$ , рентгенолюмінесценція синтезованого сухого  $\text{LaF}_3:\text{Tb}$  (в) та водної колоїдної системи  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{LaF}_3:\text{Tb}$  (г) [65, 66], залежність адсорбції  $\text{RuBiNik}$  на поверхні  $\text{LaF}_3:\text{Tb}/\text{Citr}$  від часу (д) [41].<sup>3</sup>

Такі наноконкомпозити також можуть бути використані для фотодинамічної протипухлинної терапії, зокрема, інтегровані в середовище біоактивної кераміки [65, 66], та застосовані в кістковій хірургії, ускладненій пухлинними процесами.

## 5. СИНТЕЗА ТА ВЛАСТИВОСТІ МАГНЕТНИХ РІДИН

Для досліджень синтезовано зразки магнетних рідин на основі фізіологічного розчину (ФР), що містили магнеточутливі багаторівневі поліфункціональні НК [20, 22, 24–28, 48, 50, 52–54, 70, 71]. У якості протипухлинних лікарських препаратів, іммобілізованих в оболонці НК, використовували ЦП, ДР, ГЦ, а також АТ CD 95, HER2. Як свідчать результати випробувань, адсорбційний метод іммобілізації хеміотерапевтичних препаратів на поверхні магнеточутливих носіїв має переваги перед ковалентним, оскільки характеризується збереженням їхньої цитотоксичності й є сприятливим для вивільнення у біологічне середовище.

Встановлено умови ефективної ковалентної іммобілізації антигену на поверхні магнеточутливого носія та сумісної адсорбції хеміотерапевтичних препаратів й антигену для формування оболонки з комбінованим механізмом протипухлинної дії та забезпечення розпізнавання специфічних клітин.

Магнетні носії стабілізували олеатом Натрію (ол. Na,  $C_8H_{17}CH=CH(CH_2)_7CO-O-Na$ ) за температури у  $80^\circ C$  (динамічний режим, 1 год) та поліетиленгліколем (ПЕГ-2000). Відомо, що ПЕГ перешкоджає адсорбційним взаємодіям компонентів рідини з білками, що є важливим для медичних застосувань магнетних рідин. Наважки олеату Натрію  $m$  для стабілізації поверхні НЧ і НК у складі МР розраховували за концентрацією гідроксильних груп на їхній поверхні. Розрахунок проводили за формулою  $m = VMg$ , де  $V$  — концентрація поверхневих активних гідроксильних груп,  $M$  — молекулярна маса ол. Na (304 г/моль),  $g$  — наважка НЧ або НК. Додаткове модифікування ПЕГ-2000 здійснювали в динамічному режимі з використанням шейкера; кількість полімеру складала 10–15% від маси наважки НЧ  $Fe_3O_4$  або НК.

Мірювання намагнетованости виконували за допомогою магнетометра з вібрувальним зразком ( $f \cong 283$  Гц, час мірювання  $\cong 100$  с,  $T \cong 300$  К) в залежності від зовнішнього магнетного поля ( $H$ ). Результати магнетних мірювань [26, 27, 48] свідчать про зменшення коерцитивної сили  $H_c$  магнетних рідин у порівнянні з відповідними вихідними наноконкомпозитами. Це пов'язане з тим, що рівноважна орієнтація магнетних моментів частинок МР у зовнішньому магнетному полі досягається обертанням самих частинок відносно дисперсійного середовища. В умовах експерименту час Броунової обертової дифузії ансамблю частинок МР є значно

меншим часу Неєлевої релаксації намагнетованости відповідних частинок, розподілених у твердій матриці. За незначну гістерезу МР відповідають, ймовірно, залишки агрегатів, утворених її НЧ.

Значення намагнетованости наситу феро- та феримагнетних частинок також понижуються зі зменшенням розмірів. Як відомо, монокристал магнетиту за температури у 300 К характеризується величиною намагнетованости наситу ( $\sigma_s$ )  $\cong 92$  Гс·см<sup>3</sup>/г, значення якої прямує до  $\cong 98$  Гс·см<sup>3</sup>/г із  $T \rightarrow 0$  К. НЧ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> з  $d < 23$  нм за температури у 300 К є абсолютно однодоменими та суперпарамагнетними (намагнетованість частинки за будь-яких значень і напрямів магнетного поля залишається однорідною по всьому її об'єму) [27].

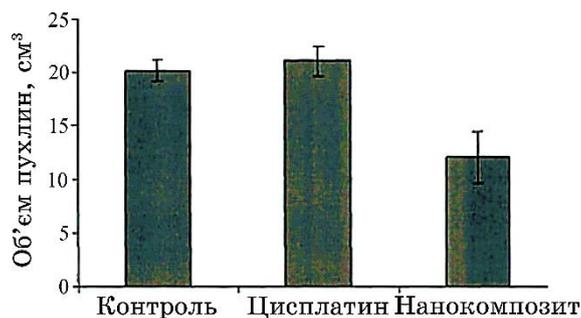
### 5.1. Цитотоксичні властивості та біологічна безпека магнетних рідин

Цитотоксичні властивості МР, що містять магнетит і ЦП (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@Ol.Na@ПЕГ/ЦП + ФР), досліджували в ІЕПОР ім. Р. Є. Кавецького НАН України на чутливих і резистентних до дії ЦП клітинних лініях раку молочної залози людини (MCF-7 і MCF-7/CR відповідно) та пухлинах Геренової карциноми [56, 72]. Резистентні клітини MCF-7/CR одержано шляхом вирощування вихідних клітин лінії MCF-7 у культуральному середовищі з додаванням наростальних концентрацій ЦП в діяпазоні доз від 0,01 до 6 мкг/мл. Формування резистентности пухлин до ЦП проводили шляхом послідовних перещеплень пухлинних клітин, які одержували від щурів лінії Wistar з Гереновою карциномою після проведення курсу терапії ЦП.

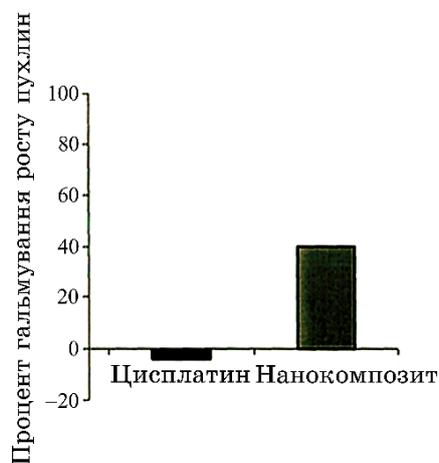
Виготовлена для досліджень МР Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@Ol.Na@ПЕГ/ЦП + ФР [56] чинила достовірний протипухлинний ефект на пухлини резистентного до цисплатину штаму: середній об'єм пухлин знижувався від  $20,2 \pm 1,0$  см<sup>3</sup> у контрольній групі до  $12,1 \pm 2,4$  см<sup>3</sup> у тварин, яким вводили нанокомпозит (рис. 3); відсоток гальмування росту пухлин складав 40% (рис. 4).

У системах *in vitro* й *in vivo* доведено переваги застосування МР Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@Ol.Na@ПЕГ/ЦП + ФР порівняно з традиційним використанням ЦП. Так, наприклад, показано, що найбільша цитотоксична активність, відзначена у резистентній лінії MCF-7/CR, пов'язана з більш активним накопиченням НЧ залізовмісного магнетика у клітинах за рахунок високого рівня рецепторів трансферину, а також через порушення системи антиоксидантного захисту резистентних клітин. Встановлено, що магнетна рідина Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@Ol.Na@ПЕГ/ЦП + ФР викликає в клітинах резистентної лінії виражені цитоморфологічні зміни та генотоксичні ефекти.

Таким чином, наведені дані свідчать про перспективу викорис-



**Рис. 3.** Середній об'єм пухлин резистентної до цисплатину Геренової карциноми після терапії цисплатином і феромагнетним нанокомпозитом. Вісь абсцис — групи тварин, на які діяли різними чинниками, вісь ординат — об'єм пухлини (см<sup>3</sup>) [56].<sup>4</sup>



**Рис. 4.** Процент гальмування росту резистентної до цисплатину Геренової карциноми за терапії цисплатином і феромагнетним нанокомпозитом [56].<sup>5</sup>

тання МР  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{O}1.\text{Na}@\text{ПЕГ}/\text{ЦП} + \text{ФР}$  для патогенетично обґрунтованої таргетної терапії злоякісних новоутворень.

Біологічну безпеку МР  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{O}1.\text{Na}@\text{ПЕГ}/\text{ЦП} + \text{ФР}$  у порівнянні з традиційним використанням ЦП оцінювали за загальними та біохімічними показниками крові щурів лінії Wistar після завершення курсу терапії. Дослідження провадили на двох групах тварин (яким вводили цисплатин і яким вводили МР  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{O}1.\text{Na}@\text{ПЕГ}/\text{ЦП} + \text{ФР}$ ). Встановлено, що цисплатин і МР приводять до підвищення рівня креатиніну у сироватці крові дослідних тварин. За іншими біохімічними показниками сироватки

крові та загальними показниками крові вплив вказаних агентів практично не відрізняється.

Отже, показано, що використання МР за загальними та біохімічними показниками крові не створює більш токсичного впливу на організм у порівнянні з офіційним протипухлинним препаратом цисплатин.

Зазначимо, що у тварин дослідних груп, яким вводили цисплатин і яким вводили МР  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{Ol.Na}@\text{ПЕГ}/\text{ЦП} + \text{ФР}$ , були виявлені подібні зміни у структурі печінки та нирок.

Детальніше методики та результати наведених досліджень містяться в [56, 72].

## 5.2. Застосування моделю «ядро–багат шарова оболонка» для розрахунків розмірних параметрів поліфункціональних наноконструкцій

У роботі [48] підтверджено, що для полідисперсної МР на основі магнетиту узгодження експериментальної та теоретичної кривих магнетування можливе за припущення наявності у частинок  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  складної магнетної структури, а саме, слабомагнетного приповерхневого шару товщиною  $h_1 \cong 0,83$  нм (стала ґратниці магнетиту за 300 К складає 0,824 нм). У [26, 48] встановлено, що розрахунки кривої магнетування МР на основі однодоменого  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  в рамках Ланжевенової теорії парамагнетизму задовільно узгоджуються з експериментальними результатами за припущення, що намагнетованість наситу частинок магнетиту залежить від їхніх розмірів, а по експериментально виміряних розподілах за розмірами наночастинок в ансамблі можна розрахувати криву магнетування МР на їхній основі.

Систематичними дослідженнями магнетних властивостей наноконструкцій типу ядро–оболонка та на основі аналізу одержаних даних обґрунтовано використання ядер НК (ансамблю суперпарамагнетних носіїв) у якості зонда для визначення та контролю розмірних параметрів складної оболонкової будови НК, зокрема у складі магнетних рідин, що дало можливість удосконалити метод магнетної гранулометрії та розширити межі його використання [26–28, 48, 73].

Наведений на рисунку 1 модель побудовано за результатами досліджень реальних НК структури типу ядро–оболонка з багат шаровою оболонкою, які використовуються для одержання нових магнеточутливих онкологічних лікарських засобів [27, 28].

Так, в [73] запропоновано й апробовано розрахункову методику та здійснено перевірку її експериментальними дослідженнями. Для досліджень використано ансамблі НК  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , НК  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ЦП}$  та  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ЦП}/\text{Ol.Na}/\text{ПЕГ}$  ( $\text{Ol.Na}$  — олеат Натрію, ПЕГ — поліе-

тиленгліколь), а також наповнені вказаними наноструктурами магнетні рідини на основі води або ФР. Проаналізовано вирази для знаходження максимальної питомої площі поверхні ансамблів НК з одно- та двошаровими оболонками, а також умови оптимізації НК за максимальною площею поверхні їхніх оболонок.

Зазначимо, що наведені методичні підходи [73] є застосовними до НК на основі суперпарамагнетних ядер, що містять у структурі оболонки інші хеміотерапевтичні препарати, наприклад доксорубіцин або гемцитабін, а також для розрахунків питомої площі поверхні шарів за довільних значень їхніх кількості та густини. Результати роботи є актуальними також для використання в розробках нових магнетокерованих адсорбційних матеріалів технічного, технологічного, екологічного та медично-біологічного призначення, медичних тест-систем тощо.

### 5.3. Нові векторні системи на основі МР для застосування в онкології

Технологічна схема виготовлення нової магнетокерованої поліфункціональної протипухлинної векторної системи на основі магнетних рідин, що містять необхідні лікарські препарати в структурі НК (рис. 1), складається зі стадій, наведених на рис. 5 [72].

На кожній стадії одержання таких векторних систем здійснювали контроль їхніх фізико-хімічних і магнетних параметрів, біологічної активності. Для контролю використано методи рентгенофазової аналізи, термогравіметричної аналізи, рентгенівської фотоелектронної спектроскопії, трансмісійної електронної мікроскопії, вібраційної магнетометрії, цитохімічній тощо. Встановлено оптимальні значення розмірних і магнетних характеристик магнетного носія (однодоменного магнетиту) та параметри для їхньої стандартизації [26–28, 48]. Параметри магнетної рідини з оптимізованими властивостями для одержання магнетокерованої векторної системи надано у табл. 2.

Одержані результати розвивають фізико-хімічні основи розробки нових типів векторних систем протипухлинних препаратів на основі МР для застосування в онкології та використано для їхньої оптимізації, стандартизації та контролю параметрів у процесі виробництва. Крім того, результати наведених досліджень можуть бути використані в розробках нових магнетокерованих адсорбційних матеріалів технічного, технологічного, екологічного та медично-біологічного призначення, у виробництві медичних тест-систем тощо.

З метою практичного впровадження розробок зареєстровано тимчасовий технологічний регламент на виробництво речовини «Магнетит У» [74], яка є нанорозмірним однодоменним  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  та



**Рис. 5.** Технологічна схема виготовлення нового магнетокерованого поліфункціонального лікарського засобу — протипухлинної векторної системи.<sup>6</sup>

**ТАБЛИЦЯ 2.** Фізичні параметри оптимізованої магнетної рідини за  $T = 300 \text{ К}$ .<sup>7</sup>

Назва характеристики, одиниця вимірювання	Значення фізичної величини
Концентрація магнетиту, мг/мл	14
Розмір частинок магнетиту, нм	4–22
Середній розмір частинок магнетиту, нм	10,8
Середній розмір частинок магнетиту, стабілізованих олеатом натрію, нм	16,8
Намагнетованість насити $M_{\infty}$ , Гс	$14,1 \pm 2,5\%$
Гіпсометрична висота, см	$25 \pm 10\%$
В'язкість $\eta$ , мПа·с	$1,14 \pm 3\%$
Густина $\rho_{\text{МР}}$ , г/см <sup>3</sup>	$1,14 \pm 1,0\%$

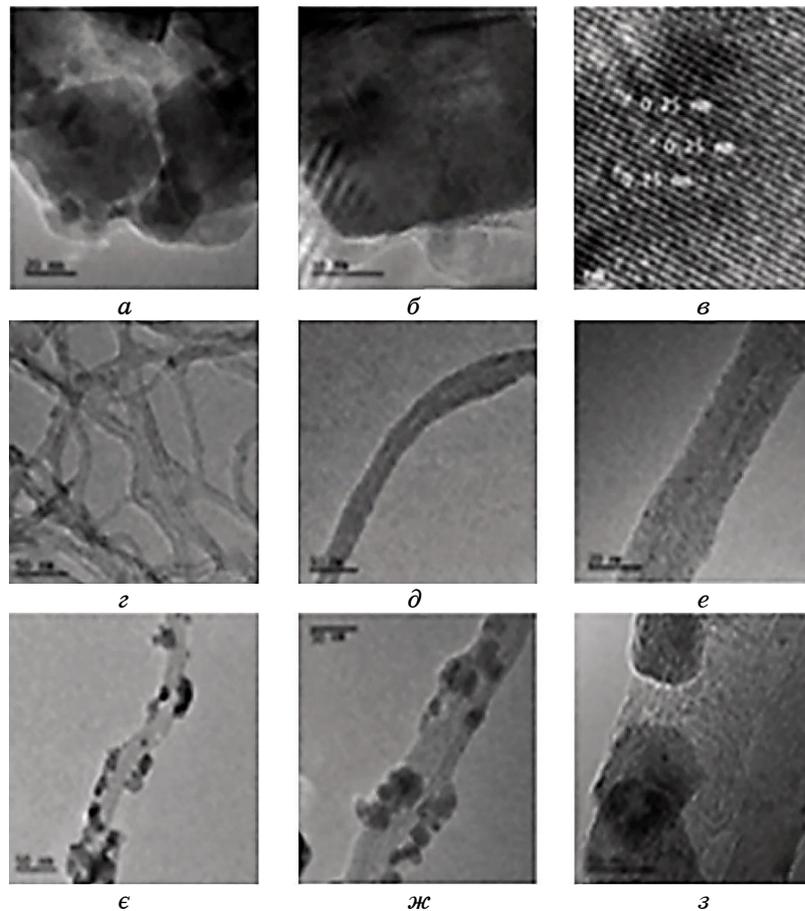
може слугувати для створення нового покоління поліфункціональних онкологічних лікарських засобів адресного доставляння та локальної терапії комбінованими і комплексними методами, включаючи хеміо- й імунотерапевтичний, радіологічний нейтрон-захоплювальний та інші. Розроблено також тимчасовий технологічний регламент на виробництво магнетної рідини [75] на основі однодоменого магнетиту, що може містити ЦП, ДР, антитіло CD 95 чи HER2.

#### 5.4. ПРОТИПУХЛИННИЙ ЛІКАРСЬКИЙ ЗАСІБ «ФЕРОПЛАТ»

Синтезовані та досліджені МР  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{Ol.Na}@\text{ПЕГ}/\text{ЦП} + \text{ФР}$  використано під час створення спільно з Інститутом експерименталь-

ної патології, онкології і радіобіології ім. Р. Є. Кавецького НАН України нового вітчизняного протипухлинного лікарського засобу «Фероплат». Ідея вказаного лікарського засобу полягає в стратегії подолання резистентності злоякісних пухлин щодо цисплатину шляхом фармакологічної корекції обміну ендogenous заліза, що забезпечується застосуванням залізовмісного нанокompозиту та цисплатину [56, 72].

«Фероплат» являє собою кон'югат НЧ магнетної рідини з ЦП. Він є стандартизованим засобом для підвищення ефективності хеміотерапії та подолання медикаментозної резистентності злоякісних новоутворень і призначений для цільового доставляння



**Рис. 6.** ПЕМ-зображення синтезованих НЧ  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  (а, б, в); БНТ (г, д, е) та ВНТ, модифікованих мангановим феритом (є, ж, з). Оптимальна (з максимальною ефективністю) концентрація ВНТ в системі  $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{ВНТ}$  ( $A_{\text{max}}$ ) становила  $\phi = 0,044$  (об.) [85].<sup>8</sup>

цитостатика безпосередньо до пухлинної тканини, що забезпечує максимальне надходження його у клітини та сприяє підвищенню терапевтичного ефекту. Його здатність до вибіркового накопичення в пухлині поліпшує протипухлинний ефект ЦП за підвищення рівня біологічної безпеки. На відміну від відомих хеміопрепаратів, «Фероплат» активніший щодо пухлин, резистентних до ЦП, і виявляє меншу токсичність щодо нормальних клітин; не має аналогів у світі. На цей час успішно завершено доклінічні випробування «Фероплату».

## 6. ВЗАЄМОДІЯ НАНОСТРУКТУР З ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИМ ВИПРОМІНЕННЯМ

Створення нових ефективних захисних матеріалів, здатних поглинати електромагнетне (ЕМ) випромінення в заданих діапазонах електромагнетного спектру, є важливим науково-технічним завданням, тісно пов'язаним з використанням високотехнологічної електроніки та боротьбою з електромагнетним смогом [15, 33, 34, 76–91]. Створенню наукових основ захисних покриттів, активних в інфрачервоному (ІЧ) та надвисокочастотному (НВЧ) діапазонах спектру, в сучасній науковій літературі присвячено значну кількість теоретичних та експериментальних досліджень, які розглядають, наприклад, питання щодо резонансних частот наночастинок, розміщених поблизу пласкої поверхні та впливу мультипольних взаємодій на спектер їх вбирання, роль великих квантових цяток у моделю взаємодійних плазмових осциляторів тощо. Широкосмугове вбирання та широка смуга пропускання в цьому випадку є двома важливими чинниками, що визначають експлуатаційну придатність матеріалів.

Як правило, такі матеріали та покриття є складними багаточастиковими структурами, що містять компоненти з діелектричними, електропровідними та магнетними втратами електромагнетної енергії. Тому було синтезовано та досліджено певний асортимент таких компонентів (табл. 3), що взаємодіють з випроміненням відповідних спектральних діапазонів [87].

Слід також вказати, що значний інтерес в рамках цієї тематики викликають системи типу полімерна матриця–нанодисперсний функціональний наповнювач як основа створення стійких до впливу зовнішнього середовища масивних, ультрадисперсних, плівкових, волокнистих і ниткових композитів, що ефективно взаємодіють з електромагнетним випроміненням і характеризуються додатковими новими унікальними властивостями внаслідок міжфазної взаємодії компонентів [76]. Прикладом створення таких матеріалів є розробка вуглецевих ферумвмісних (Fe/C) нанотрубок і нановолокон з магнетними й електропровід-

ТАБЛИЦЯ 3. Компоненти з діелектричними, електропровідними та магнетними втратами.<sup>9</sup>

Матеріали з розвинутою поверхнею та фазовими переходами типу метал-діелектрик, метал-напівпровідник, провідник-надпровідник)	Нанорозмірні ферити та їхні тверді розчини: $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)\text{Fe}_2\text{O}_4$ , $(\text{Fe}_{1-x}\text{Zn}_x)\text{Fe}_2\text{O}_4$ , $(\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x)\text{Fe}_2\text{O}_4$ , $(\text{Fe}_{1-x}\text{Ni}_x)\text{Fe}_2\text{O}_4$ , $\text{BaFe}_2\text{O}_4$ , $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	Вуглецеві наноматеріали і нанокompозити: БВНТ, нановолокнисті структури, графенові нанопластики	Метал-вуглецеві НК типу ядро-оболонка ( $\text{Me}/\text{C}$ ; $\text{Me} = \text{Fe}, \text{Ni}, \text{Co}, \text{Mn}, \text{FeNi}, \text{FeCo}, \text{Ni-Co}$ )	Нанорозмірні напівпровідники, речовини з електронно-йонною провідністю $\text{CdS}, \text{CuS}, \text{CuI}, \text{AgI}$
--	--	---	---	---

ними властивостями [77] та поліпропіленових (ПП) монониток на їхній основі [78].

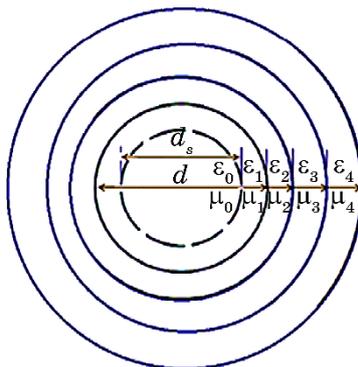
В роботах [85, 86] виконано дослідження з метою синтезу наноструктур на основі фериту Мангану та багатостінних вуглецевих нанотрубок (БВНТ) в складі полімерних композитів з підвищеною здатністю вбирання надвисокочастотного випромінення. Для виготовлення полімерних матриць використовували поліхлортрифторетилен та епоксидну смолу. Виявлено наявність ефективного вбирання в діапазоні частот 5–20 ГГц і встановлено, що для НК з БВНТ коефіцієнт вбирання у 2,5–3 рази перевищує це значення для фериту Мангану.

Синтезовано та досліджено [79, 80, 83] наночастинки NiCo і нанокompозити нікель-кобальт на графенових нанопластиках ( $\text{NiCo}@ГНП$ ), на високодисперсному кремнеземі ( $\text{NiCo}@SiO$ ), на неокиснених й окиснених багатошарових нанотрубках ( $\text{NiCo}@НБВНТ$ ,  $\text{NiCo}@ОБВНТ$ ) методом хемічного співосадження карбонатів Ніклю та Кобальту з розчину гідразингідрату. Розмір металевих частинок сягає 20 нм, а їхніх агломератів — до 200 нм. Визначено дійсні й уявні складові комплексних діелектричної та магнетної проникностей дисперсних систем нанокompозитів методами надвисокочастотної інтерферометрії. Досліджені наноструктури є перспективними для створення матеріалів, що вбирають надвисокочастотне випромінення.

В [87–89] повідомляється про виготовлення та дослідження полімернаповнених фарбових покриттів, активних у надвисоко-

ТАБЛИЦЯ 4. Основні властивості покриттів.<sup>10</sup>

Властивість, характеристика	Значення
Діапазон робочих частот, ГГц	6–80
Відбивання в НВЧ-діапазоні, дБ	–(10–14)
Відбивання в ГЧ-діапазоні, дБ	–(8–10)
Водовбирання, %	1–2
Товщина, см	0,15–0,35
Поверхнева густина, кг/м <sup>2</sup>	≅ 4,1

Рис. 7. Якісний модель оптимізованого вбирача електромагнетного випромінення типу ядро–оболонка.<sup>11</sup>

частотному (НВЧ) та близькому інфрачервоному діапазонах спектру. Основні параметри покриттів наведено в табл. 4.

Перевагами таких покриттів є функціональність у НВЧ- й ГЧ-діапазонах, висока атмосферостійкість, технологічність. До шляхів удосконалення їх можна віднести зменшення коефіцієнтів відбивання та масо-габаритних характеристик, наприклад, використанням НК типу ядро–оболонка, що містять магнетні, діелектричні й електропровідні компоненти, оптимізовані за втратами й імпедансно узгоджені з відкритим простором (рис. 7). В цьому випадку ідея його трансформації зі схеми рис. 1 полягає в оптимізації за хемічним складом і розмірами ядра й оболонок структури, значеннями їхніх діелектричної та магнетної проникностей за умови узгодження з відкритим простором:

$$\varepsilon_0 > \varepsilon_1 > \varepsilon_2 > \varepsilon_3 > \varepsilon_4 \cong \varepsilon_{\text{вп}}, \quad \mu_0 > \mu_1 > \mu_2 > \mu_3 > \mu_4 \cong \mu_{\text{вп}},$$

втратами електромагнетної енергії, ваговими характеристиками тощо [87, 88]. Певним практичним наближенням до наведених вимог відповідають НК типу ядро–оболонка  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{C}$  [90,

91].

На завершення зазначимо, що, крім наукового, практичного та методологічного, наведені дослідження мають ще й навчальне значення: зокрема, важливим завданням є підготовка студентів і молодих спеціалістів вищої кваліфікації відповідних спеціальностей. Тому наведені матеріали використано у освітньому процесі [15, 24, 25, 92, 93] вітчизняних університетів (НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», КНУ імені Тараса Шевченка), під час підготовки аспірантів і докторантів.

## 7. ВИСНОВКИ

Проаналізовано сучасний стан і перспективи найбільш актуальних теоретичних та експериментальних авторських досліджень в рамках науково-практичного напрямку «Поліфункціональні магнеточутливі наноструктури та матеріали». Розглянуто приклади розробок, пов'язаних з: хемічним конструюванням багаторівневих нанокомпозитів типу ядро–оболонка з функціями медично-біологічних нанороботів; створенням нового покоління магнетних наноструктурних адсорбентів з різною природою поверхні медичного, технічного, технологічного й екологічного призначення; розвитком нанотехнологічної бази сучасних малоінвазивних методів фотодинамічної протипухлинної терапії та неінвазивного керованого фармакологічного впливу заданого напрямку на біологічні клітинні системи; синтезом нових магнетних рідин на основі фізіологічного розчину, що містять магнеточутливі багаторівневі поліфункціональні НК з актуальними протипухлинними лікарськими препаратами й антитілами; створенням наукових основ і виготовленням захисних покриттів, активних у заданих діапазонах електромагнетного спектру.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. M. C. Roco, R. S. Williams, and P. Alivisatos, *Nanotechnology Research Directions: IWGN Workshop Report. Vision for Nanotechnology R&D in the Next Decade* (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ.: 2002), vol. 156, p. 171.
2. H. Gu, J. Chao, S.-J. Xiao, and N. C. Seeman, *Nature*, 465: 202 (2010); <https://doi.org/10.1038/nature09026>
3. K. Lund, A. J. Manzo, N. Dabby, N. Michelotti, A. Johnson-Buck, J. Nangreave, S. Taylor, R. Pei, M. N. Stojanovic, N. G. Walter, E. Winfree, and H. Yan, *Nature*, 465: 206 (2010); <https://doi.org/10.1038/nature09012>
4. R. A. Muscat, J. Bath, and A. J. Turberfield, *Nanoletters*, 11, No. 3: 982 (2011); <https://doi.org/10.1021/nl1037165>
5. B. Lewandowski, G. De Bo, J. W. Ward, M. Pappmeyer, S. Kuschel,

- M. J. Aldegunde, P. M. E. Gramlich, D. Heckmann, S. M. Goldup, D. M. D'Souza, A. E. Fernandes, and D. A. Leigh, *Science*, **339**, No. 6116: 189 (2013); <https://doi.org/10.1126/science.1229753>
6. Т. Е. Корочкова, В. М. Розенбаум, *Хімія, фізика і технологія поверхні*, **11–12**: 29 (2006).
  7. Т. Е. Корочкова, М. Л. Дехтяр, В. М. Розенбаум, *Хімія, фізика і технологія поверхні*, **14**: 52 (2008).
  8. Gamze Celik Cogal, Pradipta K. Das, Gozde Yurdabak Karaca, Venkat R. Bhethanabotla, and Aysegul Uygun Oksuz, *Appl. Bio. Mater.*, **4**: 7932 (2021); <https://doi.org/10.1021/acsabm.1c00854>
  9. Y. Yang, X. Arqué, T. Patino, V. Guillerm, P.-R. Blersch, J. Pérez-Carvajal, I. Imaz, D. Maspoch, and S. Sánchez, *J. Am. Chem. Soc.*, **142**: 20962 (2020); <https://doi.org/10.1021/jacs.0c11061>
  10. G. Chena, F. Zhua, A. S. J. Gana, B. Mohanb, K. K. Deyc, K. Xud, G. Huang, J. Cui, A. A. Soloveva, and Y. Meia, *Next Nanotechnology*, **2**: 1 (2023); <https://doi.org/10.1016/j.nxnano.2023.100019>
  11. D. Tang, X. Peng, S. Wu, and S. Tang, *Nanomaterials*, **14**, No. 7: 595 (2024); <https://doi.org/10.3390/nano14070595>
  12. L. Levy, Y. Sahoo, and B. J. Earl, *Chem. Mater.*, **14**: 3715 (2002); <https://doi.org/10.1021/cm0203013>
  13. А. П. Шпак, П. П. Горбик, *Фізико-хімія наноматеріалів і супрамолекулярних структур* (Київ: Наукова думка: 2007), т. 1.
  14. А. Р. Shpak and P. P Gorbyk, *Nanomaterials and Supramolecular Structures: Physics, Chemistry, and Applications* (Netherlands: Springer: 2009).
  15. А. П. Шпак, В. Ф. Чехун, П. П. Горбик, В. В. Туров, *Наноматеріали і наноконструкції в медицині, біології, екології* (Київ: Наукова думка: 2011).
  16. П. П. Горбик, А. Л. Петрановська, М. П. Турелик, С. П. Туранська, О. А. Васильєва, В. Ф. Чехун, Н. Ю. Лук'янова, А. П. Шпак, О. М. Кордубан, *Нанокapsула з функціями наноробота* (Патент України №99211 (2012)).
  17. P. P. Gorbyk and V. F. Chekhun, *Func. Mat.*, **19**, No. 2: 145 (2012).
  18. П. П. Горбик, *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*, **11**, No. 2: 323 (2013).
  19. P. P. Gorbyk, L. B. Lerman, A. L. Petranovska, and S. P. Turanska, *Advances in Semiconductor Research: Physics of Nanosystems, Spintronics and Technological Applications* (New York: Nova Science Publishers: 2014).
  20. Petro Petrovych Gorbyk, Leonid Borysovych Lerman, Alla Leonidivna Petranovska, Svitlana Petrivna Turanska, and Ievgen Volodymyrovych Pylypchuk, *Applications of Nanobiomaterials* (2016), p. 289–334; <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-41533-0.00010-6>
  21. I. V. Pylypchuk, M. V. Abramov, A. L. Petranovska, S. P. Turanska, T. M. Budnyak, N. V. Kusyak, and P. P. Gorbyk, *Nanochemistry, Biotechnology, Nanomaterials, and Their Applications (Aug. 23–26, 2017, Chernivtsi)—NANO-2017*, p. 35; [https://doi.org/10.1007/978-3-319-92567-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-92567-7_2)
  22. M. V. Abramov, A. P. Kusyak, O. M. Kaminskiy, S. P. Turanska, A. L. Petranovska, N. V. Kusyak, and P. P. Gorbyk, *Horizons in World Physics* (2017), vol. **293**, p. 1.
  23. П. П. Горбик, *Хімія, фізика та технологія поверхні*, **11**, No. 1:128 (2020); <https://doi.org/10.15407/hftp11.01.128>

24. І. В. Уварова, П. П. Горбик, С. В. Горобець, О. А. Іващенко, Н. В. Ульянченко, *Наноматеріали медичного призначення* (Київ: Наукова думка: 2014).
25. С. В. Горобець, О. Ю. Горобець, П. П. Горбик, І. В. Уварова, *Функціональні біо- та наноматеріали медичного призначення* (Київ: Кондор: 2018).
26. N. V. Abramov, S. P. Turanska, A. P. Kusyak, A. L. Petranovska, and P. P. Gorbyk, *J. Nanostruct. Chem.*, **6**, No. 3: 223 (2016); <https://doi.org/10.1007/s40097-016-0196-z>
27. М. В. Абрамов, С. П. Туранська, П. П. Горбик, *Металофізика та новітні технології*, **40**, №4: 423 (2018); <https://doi.org/10.15407/mfint.40.04.0423>
28. М. В. Абрамов, С. П. Туранська, П. П. Горбик, *Металофізика та новітні технології*, **40**, №10: 1283 (2018); <https://doi.org/10.15407/mfint.40.10.1283>
29. О. М. Федоренко, П. П. Горбик, О. О. Чуйко, М. В. Абрамов, Д. Л. Старокадомський, А. Л. Петрановська, *Доповіді НАН України*, **8**: 161 (2004);
30. Л. С. Семко, О. І. Кручек, Л. П. Сторожук, П. П. Горбик, *Металофізика та новітні технології*, **33**, №7: 985 (2011).
31. Л. С. Семко, О. І. Кручек, Ю. А. Шевляков, П. П. Горбик, *Фізика і хімія твердого тіла*, **10**, №2: 447 (2009).
32. Л. С. Семко, Ю. А. Шевляков, О. О. Чуйко, П. П. Горбик, *Металофізика та новітні технології*, **28**, №6: 729 (2006).
33. П. П. Горбик, С. М. Махно, І. В. Дубровін, М. В. Абрамов, В. М. Міщенко, Р. В. Мазуренко, А. Л. Петрановська, Є. В. Пилипчук, С. Л. Прокопенко, *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*, **15**, вип. 1: 47 (2017).
34. П. П. Горбик, М. В. Абрамов, І. В. Дубровін, С. М. Махно, С. П. Туранська, *Успіхи фізики металів*, **18**, №1: 59 (2017).
35. П. П. Горбик, В. Н. Мищенко, Н. В. Абрамов, Ю. Н. Трощенко, Д. Г. Усов, *Поверхність*, **1**, №16: 165 (2010).
36. П. П. Горбик, І. В. Дубровін, М. В. Абрамов, *Поверхність*, **7**, №22: 186 (2015).
37. П. П. Горбик, І. В. Дубровін, М. В. Абрамов, *Хімія, фізика та технологія поверхні*, **8**, №2: 194 (2017); <https://doi.org/10.15407/hftp08.02.194>
38. П. П. Горбик, І. В. Дубровін, М. В. Абрамов, *Поверхність*, **4**, №19: 232 (2012).
39. П. П. Горбик, А. Л. Петрановская, Е. В. Пилипчук, Н. В. Абрамов, Е. И. Оранская, А. М. Кордубан, *Хімія, фізика та технологія поверхні*, **2**, №4: 385 (2011).
40. П. П. Горбик, І. В. Дубровін, М. В. Абрамов, *Хімія, фізика та технологія поверхні*, **7**, №2: 133 (2016); <https://doi.org/10.15407/hftp07.02.133>
41. Andrii Kusyak, Alla Petranovska, Oleksandr Shcheglov, Ruslan Kravchuk, Yaroslav Shuba, and Petro Gorbyk, *Hybrid Advances*, **5**: 100054 (2024); <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100154>
42. A. L. Petranovska, M. V. Abramov, N. M. Oranashchuk, S. P. Turanska, N. V. Kusyak, and P. P. Gorbyk, *Chem., Phys. Technol. Surf.*, **9**, No. 4: 353 (2018); <https://doi.org/10.15407/hftp09.04.353>
43. A. L. Petranovska, M. V. Abramov, N. M. Oranashchuk, S. P. Turanska, P. P. Gorbyk, N. V. Kusyak, A. P. Kusyak, N. Yu. Lukyanova, and

- V. F. Chekhun, *Chem., Phys. Technol. Surf.*, **10**, No. 4: 419 (2019); <https://doi.org/10.15407/hftp10.04.419>
44. P. P. Gorbyk, A. L. Petranovska, M. P. Turelyk, N. V. Abramov, V. F. Chekhun, and N. Yu. Lukyanova, *Chem., Phys. Technol. Surf.*, **1**, No. 3: 360 (2010).
45. П. П. Горбик, И. В. Дубровин, А. Л. Петрановская, М. П. Турелик, Л. П. Сторожук, В. Н. Мищенко, Н. В. Абрамов, С. П. Туранська, С. Н. Махно, Е. В. Пилипчук, В. Ф. Чехун, Н. Ю. Лукьянова, А. П. Шпак, А. М. Кордубан, *Поверхность*, **2**, №17: 287 (2010).
46. С. П. Туранська, А. П. Кусяк, А. Л. Петрановська, С. В. Горобец, В. В. Туров, П. П. Горбик, *Хімія, фізика та технологія поверхні*, **7**, №2: 236 (2016); <https://doi.org/10.15407/hftp07.02.236>
47. I. V. Pylypchuk, D. Kolodyńska, M. Kozioł, and P. P. Gorbyk, *Nanoscale Res. Lett.*, **11**, No. 1: 168 (2016); <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1363-3>
48. A. L. Petranovska, N. V. Abramov, S. P. Turanska, P. P. Gorbyk, A. N. Kaminskiy, and N. V. Kussyak, *J. Nanostruct. Chem.*, **5**, No. 3: 275 (2015); <https://doi.org/10.1007/s40097-015-0159-9>
49. I. V. Pylypchuk, D. Kolodynska, and P. P. Gorbyk, *Sep. Sci. Technol.*, **53**, No. 7: 1006 (2018).
50. М. В. Абрамов, А. П. Кусяк, О. М. Камінський, С. П. Туранська, А. Л. Петрановська, Н. В. Кусяк, В. В. Туров, П. П. Горбик, *Поверхность*, **9**, №24: 165 (2017).
51. П. П. Горбик, Н. В. Кусяк, А. Л. Петрановська, О. І. Оранська, М. В. Абрамов, Н. М. Опанащук, *Хімія, фізика та технологія поверхні*, **9**, №2: 176 (2018); <https://doi.org/10.15407/hftp09.02.176>
52. М. В. Абрамов, А. Л. Петрановська, Є. В. Пилипчук, С. П. Туранська, Н. М. Опанащук, Н. В. Кусяк, С. В. Горобец, П. П. Горбик, *Поверхность*, **10**, №25: 245 (2018); <https://doi.org/10.15407/Surface.2018.10.245>
53. P. P. Gorbyk, Ie. V. Pylypchuk, V. I. Petrenko, and T. Yu. Nikolaienko, *J. Nano-Electron. Phys.*, **11**, No. 4: 04017 (2019); [https://doi.org/10.21272/jnep.11\(4\).04017](https://doi.org/10.21272/jnep.11(4).04017)
54. С. П. Туранська, Н. М. Опанащук, А. Л. Петрановська, Н. В. Кусяк, Б. І. Тарасюк, С. В. Горобец, В. В. Туров, П. П. Горбик, Н. В. Абрамов, *Поверхня*, **11**, №26: 577 (2019); <https://doi.org/10.15407/Surface.2019.11.577>
55. А. Л. Петрановська, Є. В. Пилипчук, П. П. Горбик, О. М. Кордубан, *Хімія, фізика та технологія поверхні*, **8**, №2: 203 (2017); <https://doi.org/10.15407/hftp08.02.203>
56. В. Ф. Чехун, Н. Ю. Лук'янова, П. П. Горбик, І. М. Тодор, А. Л. Петрановська, Н. В. Бошицька, І. В. Божко, *Протипухлинний ферромагнітний наноккомпозит* (Патент України №112490 (2016)).
57. Є. В. Пилипчук, П. П. Горбик, *Поверхность*, **6**, №21: 150 (2014).
58. Є. В. Пилипчук, Ю. О. Зубчук, А. Л. Петрановська, С. П. Туранська, П. П. Горбик, *Хімія, фізика та технологія поверхні*, **6**, №3: 326 (2015); <https://doi.org/10.15407/hftp06.03.326>
59. Л. С. Семко, Л. П. Сторожук, П. П. Горбик, М. В. Абрамов, О. І. Оранська, *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*, **8**, вип. 1: 101 (2010).
60. А. П. Кусяк, А. Л. Петрановська, П. П. Горбик, *Поверхня*, **8**, №23: 179

- (2016).
61. L. S. Semko, L. P. Storozhuk, S. V. Khutornoi, N. V. Abramov, and P. P. Gorbik, *Inorg. Mat.*, **51**, No. 5: 430 (2015); <https://doi.org/10.1134/S0020168515040135>
  62. А. П. Кусяк, А. Л. Петрановська, С. П. Туранська, П. П. Горбик, *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*, **12**, №3: 451 (2014).
  63. А. П. Кусяк, С. П. Туранська, А. Л. Петрановська, П. П. Горбик, *Доповіди НАН України*, **12**: 90 (2015); <https://doi.org/10.15407/dopovidi2015.12.090>
  64. П. П. Горбик, А. П. Кусяк, А. Л. Петрановська, *Спосіб отримання рентгенолюмінесцентного люмінофора* (Патент на корисну модель України №152194 (2022)).
  65. A. Kusyak, A. Petranovska, O. Oranska, S. Turanska, Ya. Shuba, D. Kravchuk, L. Kravchuk, G. Sotkis, V. Nazarenko, R. Kravchuk, V. Dubok, O. Bur'yanov, V. Chornyi, Yu. Sobolevs'kyu, and P. Gorbyk, *What to Know about Lanthanum* (Ed. by Catherine C. Bradley) (New York: Nova Science Publishers: 2023); <https://doi.org/10.52305/JWMC9723>
  66. А. П. Кусяк, А. Л. Петрановська, О. І. Оранська, С. П. Туранська, Я. М. Шуба, Д. І. Кравчук, Л. І. Кравчук, Г. В. Соткіс, В. Г. Назаренко, Р. М. Кравчук, В. А. Дубок, О. А. Бур'янов, В. С. Чорний, Ю. Л. Соболевський, П. П. Горбик, *Поверхня*, **15**, №30: 268 (2023); <https://doi.org/10.15407/Surface.2023.15.268>
  67. A. P. Kusyak, A. L. Petranovska, S. P. Turanska, O. I. Oranska, Yu. M. Shuba, D. I. Kravchuk, L. I. Kravchuk, V. S. Chornyi, O. A. Bur'yanov, Yu. L. Sobolevs'kyu, V. A. Dubok, and P. P. Gorbyk, *Chem., Phys. Technol. Surf.*, **12**, No. 3: 216 (2021); <https://doi.org/10.15407/hftp12.03.216>
  68. A. P. Kusyak, A. L. Petranovska, S. P. Turanska, O. I. Oranska, Ya. M. Shuba, D. I. Kravchuk, L. I. Kravchuk, V. G. Nazarenko, R. M. Kravchuk, V. S. Chornyi, O. A. Bur'yanov, Yu. L. Sobolevs'kyu, V. A. Dubok, and P. P. Gorbyk, *Chem., Phys. Technol. Surf.*, **13**, No. 4: 425 (2022); <https://doi.org/10.15407/hftp13.04.425>
  69. Danylo I. Kravchuk, Ganna V. Sotkis, Mykola M. Shcherbatiuk, Ruslan M. Kravchuk, Vassili G. Nazarenko, Petro P. Gorbyk, and Yaroslav M. Shub, *Photochemistry and Photobiologythis*, **99**, No. 1: 78 (2023); <https://doi.org/10.1111/php.13652>
  70. Б. Є. Патон, П. П. Горбик, А. Л. Петрановська, М. П. Турелик, М. В. Абрамов, О. А. Васильєва, В. Ф. Чехун, Н. Ю. Лук'янова, *Магнітна протипухлинна рідина* (Патент України №78473 (2013)).
  71. П. П. Горбик, А. Л. Петрановська, М. В. Абрамов, Н. М. Опанащук, В. Ф. Чехун, Н. Ю. Лук'янова, Н. В. Кусяк, *Композиція для магнітної векторної протипухлинної рідини* (Патент України №126627 (2022)).
  72. V. F. Chekhun, N. Y. Lukianova, I. M. Todor, D. M. Storchai, T. V. Borikun, L. A. Naleskina, A. P. Kusiak, A. P. Petranovska, and P. P. Gorbyk, *Toxicology and Applied Pharmacology Insights*, **1**, No. 1: 1 (2018); <https://doi.org/10.33140/TAPI/000005>
  73. М. В. Абрамов, С. П. Туранська, П. П. Горбик, *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*, **18**, вип. 3: 505 (2020);
  74. П. П. Горбик, М. В. Абрамов, А. Л. Петрановська, М. П. Турелик,

- О. А. Васильєва, *Тимчасовий технологічний регламент на виробництво речовини «Магнетит-У»* (Свідоцтво про реєстрацію авторського права 46056 ТТР 03291669.012:2012 (2012)).
75. П. П. Горбик, М. В. Абрамов, А. Л. Петрановська, Є. В. Пилипчук, О. А. Васильєва, *Свідоцтво 58159 на ТТР (технологічний регламент) 03291669.017:2014 на виробництво магнітної рідини* (2015).
76. П. П. Горбик и др., *Системы с развитой поверхностью и фазовыми переходами проводник–высокотемпературный сверхпроводник, полупроводник–металл, диэлектрик–суперионик* (Киев: Наукова думка: 2003); П. П. Горбик и др., *Физико-химия наноматериалов и супрамолекулярных структур* (Киев: Наукова думка: 2007), т. 1, с. 428; *ibidem*, т. 2, с. 438.
77. О. М. Седов, В. В. Холод, С. М. Махно, О. М. Лісова, М. В. Абрамов, С. П. Туранська, П. П. Горбик, *Металлофізика та новітні технології*, **41**, №9: 1153 (2019); <https://doi.org/10.15407/mfint.41.09.1153>
78. Л. С. Дзюбенко, П. П. Горбик, О. О. Сап'яненко, Н. М. Резанова, *Поверхня*, **13**, №28: 197 (2021); <https://doi.org/10.15407/Surface.2021.13.197>
79. O. M. Lisova, S. M. Makhno, G. M. Gunya, and P. P. Gorbyk, *Chem. Phys. Technol. Surf.*, **9**, No. 4: 362 (2018); <https://doi.org/10.15407/hftp09.04.362>
80. O. M. Lisova, S. M. Makhno, G. M. Gunya, and P. P. Gorbyk, *Chem. Phys. Technol. Surf.*, **8**, No. 4: 393 (2017); <https://doi.org/10.15407/hftp08.04.393>
81. М. В. Абрамов, П. П. Горбик, В. М. Богатирьов, *Поверхность*, **8**, №23: 223 (2016); <https://doi.org/10.15407/Surface.2016.08.223>
82. S. L. Prokopenko, R. V. Mazurenko, G. M. Gunja, N. V. Abramov, S. M. Makhno, and P. P. Gorbyk, *J. of Magn. and Magn. Mat.*, **494**: 165824 (2020); <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165824>
83. О. М. Лісова, С. М. Махно, Г. М. Гуня, П. П. Горбик, *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*, **18**, вып. 3: 755 (2020).
84. S. L. Prokopenko, G. M. Gunja, S. N. Makhno, and P. P. Gorbyk, *J. Nanostruct. Chem.*, **4**: 103 (2014); <https://doi.org/10.1007/s40097-014-0120-3>
85. R. Mazurenko, S. Prokopenko, M. Godzierz, A. Hercog, S. Makhno, U. Szeluga, P. Gorbyk, B. Trzebicka, and M. Kartel, *Appl. Mat. Today*, **35**: 101972 (2023); <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2023.101972>
86. R. Mazurenko, S. Prokopenko, M. Godzierz, A. Hercog, A. Kobyliukh, G. Gunja, S. Makhno, U. Szeluga, P. Gorbyk, and B. Trzebicka, *Materials*, **17**: 986 (2024); <https://doi.org/10.3390/ma17050986>
87. П. П. Горбик, *Вісн. НАН України*, **1**: 57 (2023); <https://doi.org/10.15407/visn2023.01.057>
88. П. П. Горбик, С. М. Махно, С. Л. Прокопенко та ін., *Озброєння та військова техніка*, **2**, №38: 94 (2023); <https://doi.org/1034169/2414-0651>
89. П. П. Горбик, С. М. Махно, С. Л. Прокопенко та ін., *Озброєння та військова техніка*, **3**, №38: 81 (2023); <https://doi.org/1034169/2414-0651>
90. А. Р. Кусьяк, N. V. Kussyak, O. I. Oranska, T. V. Kulyk, L. S. Dzubenko, B. V. Palianytsia, O. A. Dudarko, N. M. Korniihuk, A. L. Petranovska, and P. P. Gorbyk, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **21**, Iss. 2: 427 (2023); <https://doi.org/10.15407/nnn.21.02.427>
91. N. V. Kussyak, A. P. Kussyak, O. A. Dudarko, N. M. Korniihuk,

- A. L. Petranovska, and P. P. Gorbyk, *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, **751**, Iss. 1: 10 (2023);  
<https://doi.org/10.1080/15421406.2022.2073525>
92. П. П. Горбик, С. В. Горобець, М. П. Турелик, В. Ф. Чехун, А. П. Шпак, *Біофункціоналізація наноматеріалів і наноконкомпозитів* (Київ: Наукова думка: 2011), с. 293.
93. П. П. Горбик, *Магниточувствительные наноконкомпозиты с функциями нанороботов: синтез, свойства, применения (Физика и химия поверхности. Кн. II. Химия поверхности)* (Ред. Н. Т. Каргель, В. В. Лобанов) (Киев: Интерсервис: 2018), т. 3, с. 1213.

## REFERENCES

1. M. C. Roco, R. S. Williams, and P. Alivisatos, *Nanotechnology Research Directions: IWGN Workshop Report. Vision for Nanotechnology R&D in the Next Decade* (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ.: 2002), vol. **156**, p. 171.
2. H. Gu, J. Chao, S.-J. Xiao, and N. C. Seeman, *Nature*, **465**: 202 (2010);  
<https://doi.org/10.1038/nature09026>
3. K. Lund, A. J. Manzo, N. Dabby, N. Michelotti, A. Johnson-Buck, J. Nangreave, S. Taylor, R. Pei, M. N. Stojanovic, N. G. Walter, E. Winfree, and H. Yan, *Nature*, **465**: 206 (2010);  
<https://doi.org/10.1038/nature09012>
4. R. A. Muscat, J. Bath, and A. J. Turberfield, *Nanoletters*, **11**, No. 3: 982 (2011); <https://doi.org/10.1021/nl1037165>
5. B. Lewandowski, G. De Bo, J. W. Ward, M. Pappmeyer, S. Kuschel, M. J. Aldegunde, P. M. E. Gramlich, D. Heckmann, S. M. Goldup, D. M. D'Souza, A. E. Fernandes, and D. A. Leigh, *Science*, **339**, No. 6116: 189 (2013); <https://doi.org/10.1126/science.1229753>
6. T. E. Korochkova and V. M. Rozenbaum, *Khimiia, Fizyka i Tekhnolohiia Poverkhni*, **11–12**: 29 (2006) (in Russian).
7. T. E. Korochkova, M. L. Dekhtiar, and V. M. Rozenbaum, *Khimiia, Fizyka i Tekhnolohiia Poverkhni*, **14**: 52 (2008) (in Russian).
8. Gamze Celik Cogal, Pradipta K. Das, Gozde Yurdabak Karaca, Venkat R. Bhethanabotla, and Aysegul Uygun Oksuz, *Appl. Bio. Mater.*, **4**: 7932 (2021);  
<https://doi.org/10.1021/acsabm.1c00854>
9. Y. Yang, X. Arqué, T. Patino, V. Guillermin, P.-R. Bliersch, J. Pérez-Carvajal, I. Imaz, D. Maspoch, and S. Sánchez, *J. Am. Chem. Soc.*, **142**: 20962 (2020);  
<https://doi.org/10.1021/jacs.0c11061>
10. G. Chena, F. Zhua, A. S. J. Gana, B. Mohanb, K. K. Deyc, K. Xud, G. Huang, J. Cuia, A. A. Soloveva, and Y. Meia, *Next Nanotechnology*, **2**: 1 (2023); <https://doi.org/10.1016/j.nxnano.2023.100019>
11. D. Tang, X. Peng, S. Wu, and S. Tang, *Nanomaterials*, **14**, No. 7: 595 (2024); <https://doi.org/10.3390/nano14070595>
12. L. Levy, Y. Sahoo, and B. J. Earl, *Chem. Mater.*, **14**: 3715 (2002);  
<https://doi.org/10.1021/cm0203013>
13. A. P. Shpak and P. P. Horbyk, *Fizyko-Khimiia Nanomaterialiv i Supramolekuliarnykh Struktur* (Kyiv: Naukova Dumka: 2007), vol. **1** (in Ukrainian).
14. A. P. Shpak and P. P. Gorbyk, *Nanomaterials and Supramolecular Struc-*

- tures: *Physics, Chemistry, and Applications* (Netherlands: Springer: 2009).
15. A. P. Shpak, V. F. Chekhun, P. P. Horbyk, and V. V. Turov, *Nanomaterialy i Nanokompozyty v Medytsyni, Biologii, Ekkologii* (Kyiv: Naukova Dumka: 2011) (in Ukrainian).
  16. P. P. Horbyk, A. L. Petranovska, M. P. Turelyk, S. P. Turanska, O. A. Vasylieva, V. F. Chekhun, N. Yu. Lukianova, A. P. Shpak, and O. M. Korduban, *Nanokapsula z Funktsiiamy Nanorobota* (Patent Ukrainy No. 99211 (2012)) (in Ukrainian).
  17. P. P. Gorbyk and V. F. Chekhun, *Func. Mat.*, **19**, No. 2: 145 (2012).
  18. P. P. Horbyk, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **11**, Iss. 2: 323 (2013) (in Ukrainian).
  19. P. P. Gorbyk, L. B. Lerman, A. L. Petranovska, and S. P. Turanska, *Advances in Semiconductor Research: Physics of Nanosystems, Spintronics and Technological Applications* (New York: Nova Science Publishers: 2014).
  20. Petro Petrovych Gorbyk, Leonid Borysovych Lerman, Alla Leonidivna Petranovska, Svitlana Petrivna Turanska, and Ievgen Volodymyrovych Pylypchuk, *Applications of Nanobiomaterials* (2016), p. 289–334; <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-41533-0.00010-6>
  21. I. V. Pylypchuk, M. V. Abramov, A. L. Petranovska, S. P. Turanska, T. M. Budnyak, N. V. Kusyak, and P. P. Gorbyk, *Nanochemistry, Biotechnology, Nanomaterials, and Their Applications (Aug. 23–26, 2017, Chernivtsi)—NANO-2017*, p. 35; [https://doi.org/10.1007/978-3-319-92567-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-92567-7_2)
  22. M. V. Abramov, A. P. Kusyak, O. M. Kaminskiy, S. P. Turanska, A. L. Petranovska, N. V. Kusyak, and P. P. Gorbyk, *Horizons in World Physics* (2017), vol. **293**, p. 1.
  23. P. P. Horbyk, *Khimiia, Fizyka ta Tekhnolohiia Poverkhni*, **11**, No. 1: 128 (2020) (in Ukrainian); <https://doi.org/10.15407/hftp11.01.128>
  24. I. V. Uvarova, P. P. Horbyk, S. V. Horobets, O. A. Ivashchenko, and N. V. Ulianchenko, *Nanomaterialy Medychnoho Pryznachennia* (Kyiv: Naukova Dumka: 2014) (in Ukrainian).
  25. S. V. Horobets, O. Yu. Horobets, P. P. Horbyk, and I. V. Uvarova, *Funktsionalni Bio- ta Nanomaterialy Medychnoho Pryznachennia* (Kyiv: Kondor: 2018) (in Ukrainian).
  26. N. V. Abramov, S. P. Turanska, A. P. Kusyak, A. L. Petranovska, and P. P. Gorbyk, *J. Nanostruct. Chem.*, **6**, No. 3: 223 (2016); <https://doi.org/10.1007/s40097-016-0196-z>
  27. M. V. Abramov, S. P. Turanska, and P. P. Horbyk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 4: 423 (2018); <https://doi.org/10.15407/mfint.40.04.0423>
  28. M. V. Abramov, S. P. Turanska, and P. P. Horbyk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 10: 1283 (2018) (in Ukrainian); <https://doi.org/10.15407/mfint.40.10.1283>
  29. O. M. Fedorenko, P. P. Horbyk, O. O. Chuiko, M. V. Abramov, D. L. Starokadomskiy, and A. L. Petranovska, *Dopovidi NAN Ukrainy*, **8**: 161 (2004) (in Ukrainian).
  30. L. S. Semko, O. I. Kruchek, L. P. Storozhuk, and P. P. Horbyk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **33**, No. 7: 985 (2011).
  31. L. S. Semko, O. I. Kruchek, Yu. A. Shevliakov, and P. P. Horbyk, *Fizyka i Khimiia Tverdoho Tila*, **10**, No. 2: 447 (2009).
  32. L. S. Semko, Yu. A. Shevliakov, O. O. Chuiko, and P. P. Horbyk, *Metallofiz.*

- Noveishie Tekhnol.*, **28**, No. 6: 729 (2006) (in Ukrainian).
33. P. P. Horbyk, S. M. Makhno, I. V. Dubrovin, M. V. Abramov, V. M. Mishchenko, R. V. Mazurenko, A. L. Petranovska, Ye. V. Pylypchuk, and S. L. Prokopenko, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **15**, Iss. 1: 47 (2017) (in Ukrainian).
  34. P. P. Horbyk, M. V. Abramov, I. V. Dubrovin, S. M. Makhno, and S. P. Turanska, *Usp. Fiz. Met.*, **18**, No. 1: 59 (2017) (in Ukrainian).
  35. P. P. Horbik, V. N. Mishchenko, N. V. Abramov, Yu. N. Troshchenkov, and D. H. Usov, *Poverkhnost*, **1**, No. 16: 165 (2010) (in Russian).
  36. P. P. Horbyk, I. V. Dubrovin, and M. V. Abramov, *Poverkhnost*, **7**, No. 22: 186 (2015) (in Ukrainian).
  37. P. P. Horbyk, I. V. Dubrovin, and M. V. Abramov, *Khimiia, Fyzyka ta Tekhnolohiia Poverkhni*, **8**, No. 2: 194 (2017) (in Ukrainian); <https://doi.org/10.15407/hftp08.02.194>
  38. P. P. Horbyk, I. V. Dubrovin, and M. V. Abramov, *Poverkhnost*, **4**, No. 19: 232 (2012) (in Ukrainian).
  39. P. P. Horbyk, A. L. Petranovskaia, E. V. Pylypchuk, N. V. Abramov, E. Y. Oranskaia, and A. M. Korduban, *Khimiia, Fyzyka ta Tekhnolohiia Poverkhni*, **2**, No. 4: 385 (2011) (in Russian).
  40. P. P. Horbyk, I. V. Dubrovin, M. V. Abramov, *Khimiia, Fyzyka ta Tekhnolohiia Poverkhni*, **7**, No. 2: 133 (2016) (in Ukrainian); <https://doi.org/10.15407/hftp07.02.133>
  41. Andrii Kusyak, Alla Petranovska, Oleksandr Shcheghlov, Ruslan Kravchuk, Yaroslav Shuba, and Petro Gorbyk, *Hybrid Advances*, **5**: 100054 (2024); <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100154>
  42. A. L. Petranovska, M. V. Abramov, N. M. Opanashchuk, S. P. Turanska, N. V. Kusyak, and P. P. Gorbyk, *Chem., Phys. Technol. Surf.*, **9**, No. 4: 353 (2018); <https://doi.org/10.15407/hftp09.04.353>
  43. A. L. Petranovska, M. V. Abramov, N. M. Opanashchuk, S. P. Turanska, P. P. Gorbyk, N. V. Kusyak, A. P. Kusyak, N. Yu. Lukyanova, and V. F. Chekhun, *Chem., Phys. Technol. Surf.*, **10**, No. 4: 419 (2019); <https://doi.org/10.15407/hftp10.04.419>
  44. P. P. Gorbyk, A. L. Petranovska, M. P. Turelyk, N. V. Abramov, V. F. Chekhun, and N. Yu. Lukyanova, *Chem., Phys. Technol. Surf.*, **1**, No. 3: 360 (2010).
  45. P. P. Horbyk, Y. V. Dubrovyn, A. L. Petranovskaia, M. P. Turelyk, L. P. Storozhuk, V. N. Myshchenko, N. V. Abramov, S. P. Turanska, S. N. Makhno, E. V. Pylypchuk, V. F. Chekhun, N. Yu. Lukianova, A. P. Shpak, and A. M. Korduban, *Poverkhnost*, **2**, No. 17: 287 (2010) (in Ukrainian).
  46. S. P. Turanska, A. P. Kusiak, A. L. Petranovska, S. V. Horobets, V. V. Turov, and P. P. Horbyk, *Khimiia, Fyzyka ta Tekhnolohiia Poverkhni*, **7**, No. 2: 236 (2016) (in Ukrainian); <https://doi.org/10.15407/hftp07.02.236>
  47. I. V. Pylypchuk, D. Kołodyńska, M. Koziol, and P. P. Gorbyk, *Nanoscale Res. Lett.*, **11**, No. 1: 168 (2016); <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1363-3>
  48. A. L. Petranovska, N. V. Abramov, S. P. Turanska, P. P. Gorbyk, A. N. Kaminskiy, and N. V. Kusyak, *J. Nanostruct. Chem.*, **5**, No. 3: 275

- (2015); <https://doi.org/10.1007/s40097-015-0159-9>
49. I. V. Pylypchuk, D. Kolodynska, and P. P. Gorbyk, *Sep. Sci. Technol.*, **53**, No. 7: 1006 (2018).
  50. M. V. Abramov, A. P. Kusiak, O. M. Kaminskyi, S. P. Turanska, A. L. Petranovska, N. V. Kusiak, V. V. Turov, and P. P. Horbyk, *Poverkhnost*, **9**, No. 24: 165 (2017) (in Ukrainian).
  51. P. P. Horbyk, N. V. Kusiak, A. L. Petranovska, O. I. Oranska, M. V. Abramov, and N. M. Opanashchuk, *Khimiia, Fizyka ta Tekhnolohiia Poverkhni*, **9**, No. 2: 176 (2018) (in Ukrainian); <https://doi.org/10.15407/hftp09.02.176>
  52. M. V. Abramov, A. L. Petranovska, Ye. V. Pylypchuk, S. P. Turanska, N. M. Opanashchuk, N. V. Kusiak, S. V. Horobets, and P. P. Horbyk, *Poverkhnost*, **10**, No. 25: 245 (2018) (in Ukrainian); <https://doi.org/10.15407/Surface.2018.10.245>
  53. P. P. Gorbyk, Ie. V. Pylypchuk, V. I. Petrenko, and T. Yu. Nikolaienko, *J. Nano- Electron. Phys.*, **11**, No. 4: 04017 (2019); [https://doi.org/10.21272/jnep.11\(4\).04017](https://doi.org/10.21272/jnep.11(4).04017)
  54. S. P. Turanska, N. M. Opanashchuk, A. L. Petranovska, N. V. Kusiak, B. I. Tarasiuk, S. V. Horobets, V. V. Turov, P. P. Horbyk, and N. V. Abramov, *Poverkhnia*, **11**, No. 26: 577 (2019) (in Ukrainian); <https://doi.org/10.15407/Surface.2019.11.577>
  55. A. L. Petranovska, Ye. V. Pylypchuk, P. P. Horbyk, and O. M. Korduban, *Khimiia, Fizyka ta Tekhnolohiia Poverkhni*, **8**, No. 2: 203 (2017) (in Ukrainian); <https://doi.org/10.15407/hftp08.02.203>
  56. V. F. Chekhun, N. Yu. Lukianova, P. P. Horbyk, I. M. Todor, A. L. Petranovska, N. V. Boshytska, and I. V. Bozhko, *Protypukhlynni Feromahnitnyi Nanokompozyt* (Patent Ukrainy No. 112490 (2016)) (in Ukrainian).
  57. Ie. V. Pylypchuk and P. P. Horbyk, *Poverkhnost*, **6**, No. 21: 150 (2014) (in Ukrainian).
  58. Ie. V. Pylypchuk, Yu. O. Zubchuk, A. L. Petranovska, S. P. Turanska, and P. P. Horbyk, *Khimiia, Fizyka ta Tekhnolohiia Poverkhni*, **6**, No. 3: 326 (2015) (in Ukrainian); <https://doi.org/10.15407/hftp06.03.326>
  59. L. S. Semko, L. P. Storozhuk, P. P. Horbyk, M. V. Abramov, and O. I. Oranska, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **8**, Iss. 1: 101 (2010) (in Ukrainian).
  60. A. P. Kusiak, A. L. Petranovska, and P. P. Horbyk, *Poverkhnia*, **8**, No. 23: 179 (2016) (in Ukrainian).
  61. L. S. Semko, L. P. Storozhuk, S. V. Khutornoi, N. V. Abramov, and P. P. Gorbik, *Inorg. Mat.*, **51**, No. 5: 430 (2015); <https://doi.org/10.1134/S0020168515040135>
  62. A. P. Kusiak, A. L. Petranovska, C. P. Turanska, and P. P. Horbyk, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **12**, Iss. 3: 451 (2014) (in Ukrainian).
  63. A. P. Kusiak, S. P. Turanska, A. L. Petranovska, and P. P. Horbyk, *Dopovidy NAN Ukrainy*, **12**: 90 (2015); <https://doi.org/10.15407/dopovidi2015.12.090>
  64. P. P. Horbyk, A. P. Kusiak, and A. L. Petranovska, *Sposib Otrymannia Rentgenoluminestsentnoho Liuminofora* (Patent na korysnu model Ukrainy

- No. 152194 (2022)) (in Ukrainian).
65. A. Kussyak, A. Petranovska, O. Oranska, S. Turanska, Ya. Shuba, D. Kravchuk, L. Kravchuk, G. Sotkis, V. Nazarenko, R. Kravchuk, V. Dubok, O. Bur'yanov, V. Chornyi, Yu. Sobolevs'kyi, and P. Gorbyk, *What to Know about Lanthanum* (Ed. by Catherine C. Bradley) (New York: Nova Science Publishers: 2023); <https://doi.org/10.52305/JWMC9723>
  66. A. P. Kusiak, A. L. Petranovska, O. I. Oranska, S. P. Turanska, Ya. M. Shuba, D. I. Kravchuk, L. I. Kravchuk, H. V. Sotkis, V. H. Nazarenko, R. M. Kravchuk, V. A. Dubok, O. A. Burianov, V. S. Chornyi, Yu. L. Sobolevskyi, and P. P. Horbyk, *Poverkhnia*, **15**, No. 30: 268 (2023) (in Ukrainian); <https://doi.org/10.15407/Surface.2023.15.268>
  67. A. P. Kussyak, A. L. Petranovska, S. P. Turanska, O. I. Oranska, Yu. M. Shuba, D. I. Kravchuk, L. I. Kravchuk, V. S. Chornyi, O. A. Bur'yanov, Yu. L. Sobolevs'kyi, V. A. Dubok, and P. P. Gorbyk, *Chem., Phys. Technol. Surf.*, **12**, No. 3: 216 (2021); <https://doi.org/10.15407/hftp12.03.216>
  68. A. P. Kussyak, A. L. Petranovska, S. P. Turanska, O. I. Oranska, Ya. M. Shuba, D. I. Kravchuk, L. I. Kravchuk, V. G. Nazarenko, R. M. Kravchuk, V. S. Chornyi, O. A. Bur'yanov, Yu. L. Sobolevs'kyi, V. A. Dubok, and P. P. Gorbyk, *Chem., Phys. Technol. Surf.*, **13**, No. 4: 425 (2022); <https://doi.org/10.15407/hftp13.04.425>
  69. Danylo I. Kravchuk, Ganna V. Sotkis, Mykola M. Shcherbatiuk, Ruslan M. Kravchuk, Vassili G. Nazarenko, Petro P. Gorbyk, and Yaroslav M. Shub, *Photochemistry and Photobiology*, **99**, No. 1: 78 (2023); <https://doi.org/10.1111/php.13652>
  70. B. Ye. Paton, P. P. Horbyk, A. L. Petranovska, M. P. Turelyk, M. V. Abramov, O. A. Vasylieva, V. F. Chekhun, and N. Yu. Lukianova, *Mahnitna Protypukhlynnna Ridyna* (Patent Ukrainy No. 78473 (2013)) (in Ukrainian).
  71. P. P. Horbyk, A. L. Petranovska, M. V. Abramov, N. M. Opanashchuk, V. F. Chekhun, N. Yu. Lukianova, and N. V. Kusiak, *Kompozytsiia dlia Mahnitnoi Vektornoj Protypukhlynnnoj Ridyny* (Patent Ukrainy No. 126627 (2022)) (in Ukrainian).
  72. V. F. Chekhun, N. Y. Lukianova, I. M. Todor, D. M. Storchai, T. V. Borikun, L. A. Naleskina, A. P. Kusiak, A. P. Petranovska, and P. P. Horbyk, *Toxicology and Applied Pharmacology Insights*, **1**, No. 1: 1 (2018); <https://doi.org/10.33140/TAPI/000005>
  73. M. V. Abramov, S. P. Turanska, and P. P. Horbyk, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **18**, Iss. 3: 505 (2020) (in Ukrainian); <https://doi.org/10.15407/nmn.18.03.505>
  74. P. P. Horbyk, M. V. Abramov, A. L. Petranovska, M. P. Turelyk, and O. A. Vasylieva, *Tymchasovyi Tekhnolohichniy Reglament na Vyrobnystvo Rechovyny 'Magnetit-U'* (Svidotstvo pro Reiestratsiiu Avtorskoho Prava 46056 TTR 03291669.012:2012 (2012)) (in Ukrainian).
  75. P. P. Horbyk, M. V. Abramov, A. L. Petranovska, Ye. V. Pylypchuk, and O. A. Vasylieva, *Svidotstvo 58159 na TTR (Tekhnolohichniy Reglament) 03291669.017:2014 na Vyrobnystvo Magnitnoi Ridyny* (2015) (in Ukrainian).

76. P. P. Gorbik et al., *Sistemy s Razvitoi Poverhnost'yu i Fazovymi Perekhodami Provodnik-Vysokotemperaturnyi Sverkhprovodnik, Poluprovodnik-Metall, Dielektrik-Superionik* (Kiev: Naukova Dumka: 2003); P. P. Gorbik et al., *Fiziko-Khimiya Nanomaterialov i Supramolekulyarnykh Struktur* (Kiev: Naukova Dumka: 2007), vol. 1, p. 428; *ibidem*, vol. 2, p. 438 (in Russian).
77. O. M. Siedov, V. V. Kholod, S. M. Makhno, O. M. Lisova, M. V. Abramov, S. P. Turanska, and P. P. Horbyk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 9: 1153 (2019); <https://doi.org/10.15407/mfint.41.09.1153>
78. L. S. Dziubenko, P. P. Horbyk, O. O. Sapienchenko, and N. M. Rezanova, *Poverkhnia*, **13**, No. 28: 197 (2021) (in Ukrainian); <https://doi.org/10.15407/Surface.2021.13.197>
79. O. M. Lisova, S. M. Makhno, G. M. Gunya, and P. P. Gorbyk, *Chem. Phys. Technol. Surf.*, **9**, No. 4: 362 (2018); <https://doi.org/10.15407/hftp09.04.362>
80. O. M. Lisova, S. M. Makhno, G. M. Gunya, and P. P. Gorbyk, *Chem. Phys. Technol. Surf.*, **8**, No. 4: 393 (2017); <https://doi.org/10.15407/hftp08.04.393>
81. M. V. Abramov, P. P. Horbyk, and V. M. Bohatyryov, *Poverkhnost*, **8**, No. 23: 223 (2016) (in Ukrainian); <https://doi.org/10.15407/Surface.2016.08.223>
82. S. L. Prokopenko, R. V. Mazurenko, G. M. Gunja, N. V. Abramov, S. M. Makhno, and P. P. Gorbyk, *J. of Magn. and Magn. Mat.*, **494**: 165824 (2020); <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165824>
83. O. M. Lisova, S. M. Makhno, H. M. Hunia, and P. P. Horbyk, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **18**, Iss. 3: 755 (2020) (in Ukrainian); <https://doi.org/10.15407/nnn.18.03.755>
84. S. L. Prokopenko, G. M. Gunja, S. N. Makhno, and P. P. Gorbyk, *J. Nanostruct. Chem.*, **4**: 103 (2014); <https://doi.org/10.1007/s40097-014-0120-3>
85. R. Mazurenko, S. Prokopenko, M. Godzierz, A. Hercog, S. Makhno, U. Szeluga, P. Gorbyk, B. Trzebicka, and M. Kartel, *Appl. Mat. Today*, **35**: 101972 (2023); <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2023.101972>
86. R. Mazurenko, S. Prokopenko, M. Godzierz, A. Hercog, A. Kobylukh, G. Gunja, S. Makhno, U. Szeluga, P. Gorbyk, and B. Trzebicka, *Materials*, **17**: 986 (2024); <https://doi.org/10.3390/ma17050986>
87. P. P. Horbyk, *Visnyk NAN Ukrainy*, **1**: 57 (2023) (in Ukrainian); <https://doi.org/10.15407/visn2023.01.057>
88. P. P. Horbyk, S. M. Makhno, S. L. Prokopenko et al., *Ozbroiennia ta Viiskova Tekhnika*, **2**, No. 38: 94 (2023) (in Ukrainian); <https://doi.org/1034169/2414-0651>
89. P. P. Horbyk, S. M. Makhno, S. L. Prokopenko et al., *Ozbroiennia ta Viiskova Tekhnika*, **3**, No. 38: 81 (2023) (in Ukrainian); <https://doi.org/1034169/2414-0651>
90. A. P. Kusyak, N. V. Kusyak, O. I. Oranska, T. V. Kulyk, L. S. Dzubenko, B. B. Palianytsia, O. A. Dudarko, N. M. Korniihuk, A. L. Petranovska, and P. P. Gorbyk, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **21**, Iss. 2: 427 (2023); <https://doi.org/10.15407/nnn.21.02.427>
91. N. V. Kusyak, A. P. Kusyak, O. A. Dudarko, N. M. Korniihuk,

- A. L. Petranovska, and P. P. Gorbyk, *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, **751**, Iss. 1: 10 (2023);  
<https://doi.org/10.1080/15421406.2022.2073525>
92. P. P. Horbyk, S. V. Horobets, M. P. Turelyk, V. F. Chekhun, and A. P. Shpak, *Biofunktionalizatsiia Nanomaterialiv i Nanokompozitiv* (Kyiv: Naukova Dumka: 2011), p. 293 (in Ukrainian).
93. P. P. Horbyk, *Magnitochuvstvitel'nyye Nanokompozity s Funkciyami Nanorobotov: Sintez, Svoistva, Primeneniya (Fizika i Khimiya Poverkhnosti. Book II. Khimiya Poverkhnosti)* (Eds. N. T. Kartel and V. V. Lobanov) (Kiev: Interservis: 2018), vol. **3**, c. 1213 (in Russian).

---

*Chuiho Institute of Surface Chemistry, N.A.S. of Ukraine,  
 17, Oleha Mudraka Str.,  
 UA-03164 Kyiv, Ukraine*

<sup>1</sup> Fig. 1. Structural model of NC of the core–multilevel-shell type. Marked:  $d = d_s + 2h_1$ —the diameter of the spherical nanoparticle magnet (core);  $d_s$ —the diameter of the magnet with saturation magnetization characteristic of the bulk material of the core;  $h_1$ —the thickness of the near-surface ‘demagnetized’ layer of the magnet,  $h_2, h_3, h_4$ —the thicknesses of the layer, modifier, drug and capsule (stabilizer), respectively, in the structure of inflammation.

<sup>2</sup> TABLE 1. Effect of magnetosensitive NC with adsorbed CP, conjugated with monoclonal antibodies CD 95, on the viability of cells of the line MCF-7 [14, 17].

<sup>3</sup> Fig. 2. TEM image ( $a$ , scale of 20 nm) and x-ray diffraction pattern ( $\sigma$ ) of  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{LaF}_3:\text{Tb}$  NC, x-ray luminescence of synthesized dry  $\text{LaF}_3:\text{Tb}$  ( $\epsilon$ ) and aqueous  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{LaF}_3:\text{Tb}$  colloidal system ( $z$ ) [65, 66], dependence of RuBiNik adsorption on the  $\text{LaF}_3:\text{Tb}/\text{Citr}$  surface as a time function ( $\partial$ ) [41].

<sup>4</sup> Fig. 3. Mean tumour volume of cisplatin-resistant Guerin carcinoma after cisplatin and ferromagnetic nanocomposite therapy. The abscissa axis—animals groups, which were affected by various factors, the ordinate axis—tumour volume ( $\text{cm}^3$ ) [56].

<sup>5</sup> Fig. 4. Percentage of growth inhibition of cisplatin-resistant Guerin carcinoma at therapy with cisplatin and ferromagnetic nanocomposite [56].

<sup>6</sup> Fig. 5. Technological scheme for the fabrication of a new magnetically controlled multifunctional medicinal product—an antitumor vector system.

<sup>7</sup> TABLE 2. Physical parameters of the optimized magnetic fluid at  $T = 300$  K.

<sup>8</sup> Fig. 6. TEM images of synthesized  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles ( $a, b, c$ ), MWCNTs ( $z, \partial, e$ ) and CNTs modified with manganese ferrite ( $\epsilon, \kappa, \varepsilon$ ). The optimal (with maximum efficiency) CNT concentration in the  $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{CNT}$  system ( $A_{\text{max}}$ ) was  $\phi = 0.044$  (vol.).

<sup>9</sup> TABLE 3. Components with dielectric, conductive, and magnetic losses.

<sup>10</sup> TABLE 4. The main properties of coatings.

<sup>11</sup> Fig. 7. Qualitative model of an optimized core–shell absorber of electromagnetic radiation.