

УДК 615:541.182.024

І. С. Чекман, чл.-кор. НАН і НАМН України, д-р мед. наук, проф.

НАНОНАУКА: ІСТОРИЧНІ ЕТАПИ РОЗВИТКУ

Приватний вищий навчальний заклад

«Київський медичний університет УАНМ», Київ, Україна

УДК 615:541.182.024

І. С. Чекман

НАНОНАУКА: ІСТОРИЧНІ ЕТАПИ РОЗВИТКУ

Приватний вищий навчальний заклад «Київський медичний університет УАНМ», Київ, Україна

Описані основні етапи історичного розвитку нанонауки та впровадження її в медицину. Незважаючи на свою перспективність, протягом багатьох років нанонаука, тобто вчення про частинки, розмір яких не перевищує 100 нм, залишалася емпіричною та не могла знайти свого практичного застосування. Лише наприкінці 80-х — на початку 90-х років ХХ ст., завдяки активному вивченню властивостей наночастинок, з'явилися та почали розвиватися такі наукові напрями, як наномедицина та нанофармакологія. Наразі фізичні властивості наночастинок можуть використовуватися з метою діагностики захворювань, у регенеративній медицині, для розробки лікувальних засобів пролонгованої, особливо селективної, дії. Сьогодні усі країни світу інвестують чималі кошти у розвиток нанотехнологій. Не є виключенням і Україна, де чимало наукових установ продовжує активно займатися вивченням впливу наночастинок на біологічні тканини за фізіологічних і патологічних умов та розробкою нових і модифікацією існуючих лікувальних засобів з використанням нанотехнологій.

Ключові слова: нанонаука, наноматеріали.

UDC 615:541.182.024

I. S. Chekman

NANOSCIENCE: HISTORICAL STAGES OF DEVELOPMENT

Kyiv Medical University of UAFM, Kyiv, Ukraine

The aim of this article is to look through the steps of historical development of nanoscience and, particularly, its implementation in medicine. Nanoscience refers to the study of particles which measure up to 100 nm. Prospective though it was, for a long time the nanoscience had only been empirical study and couldn't find its practical use. Only in the end of 80's — beginning of 90's of XX century, due to numerous research dedicated to properties of nanoparticles, such branches of science as nanomedicine and nanopharmacology appeared and developed dramatically. Nowadays the nanoparticles are widely used in medicine: in diagnostics, regeneration medicine, for development of medicines with long-termed and selective action. Nowadays, countries all around the world, including Ukraine, invest large amounts of money in nanotechnology. Numerous scientific institutions in Ukraine are working on research aimed at the nanoparticles' impact on the biological tissue under physiological and pathological conditions, developing of new and modifying of the existing medicines using nanotechnology.

Key words: nanoscience, nanostructured materials.

Історія — скарбниця наших дій, свідок минулого, приклад і наука для сучасності, засторога для майбутнього.

*Сервантес Сааведра де Мігель
(1547–1616), іспанський письменник*

За свою історію людство пережило чимало хвилюючих наукових відкриттів у всіх галузях життєдіяльності, зокрема в медицині й лікознавстві [1].

Що ж стосовно фармакотерапії, то основними віхами її розвитку слід вважати винайдення таких лікувальних засобів, як-от:

1. Засоби для загального наркозу (оксид діазоту, ефір для наркозу, кетамін, натрію оксибутират), що дали можливість проводити безболісні

операції та зменшити кількість післяопераційних ускладнень.

2. Протимікробні засоби (антисептики, сульфаніламиди, антибіотики, фторхінолони, протитуберкульозні, протималярійні, протисифілітичні препарати), що врятували життя мільярдам людей. Проте проблема ефективного лікування бактеріальних і вірусних захворювань залишається актуальною, адже відбувся розвиток резистентних до цих препаратів штамів мікроорганізмів.

мів. Тому досі існує необхідність у нових, високо-ефективних протимікробних лікарських засобах.

3. Препарати, що впливають на серцево-судинну систему: альфа-адреноблокатори (доксазозин, празозин), бета-адреноблокатори (атенолол, бетаксоллол, бісопролол, метопролол, невіболлол, пропранолол), альфа- і бета-адреноблокатори (карведилол, лабеталлол), антагоністи кальцію (амлодипін, верапаміл, дилтіазепам, німодипін, ніфедипін, лацидипін), блокатори ангітензинперетворювального ферменту (еналаприл, капотен, лізиноприл, периндоприл, фозиноприл), блокатори рецепторів ангітензину II (лозартан, епросартан, валсартан), протиатеросклеротичні засоби (аторвастин, ловастатин, правастатин, фенофібрат та ін.). Ці медикаменти сприяли ефективнішій терапії артеріальної гіпертензії, ішемічної хвороби серця, інфаркту міокарда, гострої та хронічної серцевої недостатності, аритмій, зменшенню частоти ускладнень при захворюваннях серця і судин та підвищенню якості життя хворих. Незважаючи на впровадження в кардіологію сучасних методів профілактики і лікування серцево-судинних захворювань, сьогодні кардіологи та їхні пацієнти потребують ефективніших лікарських засобів, які б не тільки знижували артеріальний тиск, а й нормалізували діяльність серця та стан гемодинаміки, обмін речовин у міокарді зокрема та в організмі загалом.

4. Ендокринні препарати (інсулін, метформін, тироксин), які здатні підтримувати життя та зберегти працездатність хворим на цукровий діабет, мікседему та інші ендокринні захворювання, але, на жаль, не вилікувати їх остаточно.

Прикладів, що свідчать про реальні досягнення та наразі нерозв'язані проблеми сучасної фармакології, можна навести чимало. Водночас, для лікування багатьох захворювань є необхідними розробка та впровадження нових технологій отримання оригінальних й ефективних терапевтичних засобів.

Як свідчать дослідження зарубіжних і вітчизняних вчених, на створення та практичну реалізацію нових оригінальних і високоефективних препаратів витрачається чимало часу і коштів. Тому в сучасній фармакології та фармації триває розробка нових технологій отримання медикаментів. До них належать нанонаука, нанотехнології, наномедицина та нанофармакологія [2].

Цікавою є історія походження таких грецьких префіксів як «нано» і «нанно». Як свідчать історичні факти, за 600 років до нашої ери на місці нинішнього французького міста Марселя мешкало плем'я лігурів. Столицею племені був порт Фокей, з правителем-царем на ім'я Нанн. Коли у царя підросла дочка та настав час видавати її заміж, він запросив на свято до Фокея багато гостей, і з-поміж них донька мала обрати собі майбутнього чоловіка. Гостей пригощали солодкими медовими пряниками — місцевою стравою

нанно. І досі у марсельському порту місцеві кулінари готують такі ж самі медові пряники — нанно (слово «нанно» пишеться з двома н). Про цю давню історію не згадали вчені і конструктори, які винайшли прилад, що давав змогу бачити мізерні предмети, які є невидимими для неозброєного ока. Прилад назвали мікроскопом, від грецького «мікрос» — малий [3].

У 1909 р. на семінарі товариства зоологів, що проходив у німецькому місті Кіле, університетський професор Х. Ломан запропонував називати мікроскопічні водорості «нанопланктонами». І до сьогодні зоологами видається «Журнал досліджень нанопланктону».

Уперше термін, що позначав розміри матеріалів з точністю до нанометра, був запропонований у 1974 р. японським ученим-фізиком, фахівцем у галузі матеріалознавства Норіо Танігучі. У своїй доповіді «Про концептуальні основи нанотехнологій», прочитаній на міжнародній конференції “International Conference on Precision Engineering”, Н. Танігучі запропонував називати структури розмірами від 1 до 100 нанометрів «наночастинками», а методи їх отримання — нанотехнологіями [4].

Роком впровадження результатів досліджень з нанотехнологій у науково-практичну діяльність слід вважати 1981-й, коли швейцарські вчені сконструювали тунельний мікроскоп, завдяки якому можна «доторкнутися» до атома і перенести його з однієї молекули на іншу. Перший тунельний мікроскоп фірма Digital Instruments назвала «Наноскоп-1». Згодом у Великій Британії почав видаватися новий науковий часопис — “Nanotechnology”.

Як часто буває в науці, новий напрям пов'язують з іменем ученого, чиє відкриття його започаткувало. Початок розвитку нанонауки та нанотехнологій пов'язують з діяльністю лауреата Нобелівської премії Річарда Філіпса Фейнмана (1918–1988), видатного американського фізика-теоретика ХХ ст. У 1965 р. Р. Ф. Фейнман отримав Нобелівську премію за створення вчення про квантову електродинаміку. Американського вченого Р. Ф. Фейнмана та російського вченого Л. Д. Ландау вважають найвидатнішими фізиками-універсалами [5; 6].

У чому ж універсальність Р. Ф. Фейнмана та унікальність його внеску в нанонауку та нанотехнології?

Р. Ф. Фейнман народився 11 травня 1918 р. в Манхеттені, виріс у місті Фар-Рокуей (штат Нью-Йорк). Його батько, Мелвін Фейнман, був сином Ганни і Якоба Фейнманів, які жили в Мінську і в 1895 р. емігрували до США. Дідусь Річарда по материнській лінії у 1860–1870 рр. брав участь в антиросійській діяльності, за що був заарештований і засуджений до страти, проте зумів втекти з в'язниці та перебратися до Америки. Батьки Люсіль Філіпс, матері Річарда, разом із батьком переїхали до США, коли були дітьми.

Дідусь Річарда по батьківській лінії, Генрі Філіпс, народився в Польщі, в ранньому дитинстві втратив батьків, після чого жив деякий час у сирітському притулку в Англії, звідки поїхав до Америки. Мати Річарда Люсіль народилась у 1895 р., отримала гарну освіту: закінчила інститут етики і культури (той самий, де навчався Роберт Оппенгеймер). Коли їй виповнилося 18, вона познайомилася з Мелвіном Фейнманом, батьком Річарда.

Батьки Річарда ще у дитинстві відзначили особливі здібності сина до науки, особливо до фізики, математики і техніки. У середній школі Річард мав славу учня, який з легкістю розв'язував задачі з геометрії, алгебри і фізики не тільки для своїх однокласників, а й для старшокласників, до того ж самотужки міг ремонтувати детекторні радіоприймачі. Однак Річард не був занудою-відмінником, після навчання він відвідував гурток танців, де навчився добре танцювати, чудово грав на музичних інструментах і навіть виступав на концертах (цікаво те, що психологи давно помітили, що між музикою і математикою є позитивний кореляційний зв'язок, адже ще Піфагор вважав, що музикою небесних сфер править число).

Отримавши найвищий бал за навчання у гімназії, Річард у 1935 р. вступає до Массачусетського технологічного інституту (МТІ). Спочатку першокурсник Р. Ф. Фейнман інтенсивно вивчав математику, але згодом захопився фізикою і квантовою механікою. Викладачі МТІ вважали студента Фейнмана видатною особистістю. Тому після закінчення інституту, у 1939 р., його зарахували до аспірантури з одночасним виконанням обов'язків наукового асистента кафедри, що дало змогу активніше працювати над дисертацією, а також отримувати додаткову фінансову підтримку.

Однак невдовзі дисертаційні дослідження довелося перервати, оскільки Р. Ф. Фейнмана запросили взяти участь у реалізації знаменитого Манхетенського проекту зі створення атомної бомби. Після завершення цієї роботи він захистив дисертацію і почав працювати над розв'язанням проблеми квантової електродинаміки. У 1965 р. за ці дослідження Р. Ф. Фейнман спільно з С. Томоната і Ю. Зінгером отримали Нобелівську премію з фізики. Окрім досліджень у галузі квантової електродинаміки, теорії ослабких взаємодій, математичного апарату теорії взаємоперетворень елементарних частинок (діаграми Фейнмана), квантових вихрових взаємодій у надтекучого гелію та інших теоретичних аспектів фізики, учений зацікавився роботами з молекулярної біології, що стосуються структури ДНК. Протягом 1959–1960 рр. Р. Ф. Фейнман проводив дослідження з молекулярної біології спільно з М. Дельбрюком (лауреат Нобелівської премії за 1969 р. з фізіології і медицини за відкриття механізмів реплікації та генетичної структури вірусів) і

М. Мезельсоном, а також читав лекції з біології, математики та статистики в Калтеку.

У грудні 1959 р. в Каліфорнійському технологічному університеті (Калтек) 42-річний фізик-теоретик Річард Фейнман на щорічному засіданні Американського фізичного товариства зробив доповідь-лекцію: «Внизу багато місця: запрошення увійти в нову галузь фізики» (There is plenty of room at the bottom: an invitation to enter a new field of physics); точніший переклад українською мовою: «Є надмір місця на дні — запрошуюю нову царину фізики»). Ця доповідь-лекція вважається першою прямою вказівкою на нагальну необхідність розгортати наукові дослідження на рівні атомів і молекул, які пізніше японський вчений Норіо Танігучі назвав нанотехнологіями [7].

На той час фізики США знали і цінували Річарда Фейнмана та його внесок у теоретичну фізику та математику, шанували його креативний, творчий і не схильний до компромісів розум. Своєю лекцією Річард Фейнман збентежив, здивував і зацікавив слухачів, проте не настільки, щоб з 1960 р. вчені одразу б розпочали інтенсивні дослідження в галузі нанотехнологій. Світова наука замислилася і розмірковувала. У доповіді-лекції Річард Фейнман запропонував поміркувати над такими запитаннями: «А що ми отримуємо, якщо матимемо можливість довільно і по одному розміщувати атом за атомом?».

На той час це вважалось нездійсненною фантазією і не виключено, що слухачі в аудиторії Калтеку вважали Річарда Фейнмана новоявленим Жюль Верном. У ті часи ніхто не міг передбачити, що через 22 роки, у 1981-му, швейцарські вчені з Цюрихської дослідної лабораторії ІВМ Герд Біннінг і Генріх Рорер сконструюють принципово новий скануючий тунельний мікроскоп, за допомогою якого можна маніпулювати атомами.

Під час доповіді-лекції Р. Ф. Фейнман запропонував за свій рахунок видати дві премії, у розмірі по 1000 доларів кожна, за розв'язання двох завдань. Перше — сконструювати працюючий електродвигун, який можна було б втиснути в куб зі стороною 1/64 дюйма (близько 0,39 мм). Вже в листопаді 1960 р. місцевий інженер У. Мак Леллан приніс Р. Ф. Фейнману такий електродвигун. Друге завдання — розмістити 24 томів Британської енциклопедії на голівці шпильки: скорочення у 25 тис. разів від стандартного розміру букви. Цю премію у 1985 р. отримав Т. Ньюман — аспірант Стенфордського університету, котрий записав першу сторінку книги Ч. Діккенса «Повість про два міста» в тому масштабі, який рекомендував Р. Ф. Фейнман. Через десять років учені Лос-Аламоської національної лабораторії Америки розробили технологію запису книг на носіях, з яких інформацію можна читати та передавати на відстань. Те, що у 1959 р. вважалось далекою фантазією, через 35 років стало реальністю.

Хоча науковці світу не раз цитували цю доповідь-лекцію, реальні нанотехнології почали впроваджувати у багатьох країнах світу тільки наприкінці 80-х років ХХ ст.

Сприяли цьому такі кілька подій і факторів. Книга співробітника МТІ інженера Е. Дрекслера «Машини творення: настання ери нанотехнологій» побачила світ в 1986 р. у Бостоні. А у 1992-му була видана друга книга автора — «Нанотехнології. Минуле і майбутнє», в якій Е. Дрекслер розвинув ідеї та окреслив шляхи реалізації нанотехнологій у промисловості. Ці книги зацікавили вчених і виробників. Проте реального впровадження нанотехнологій у виробництво ще не відбулося [8; 9].

Сенатор з штату Теннессі Альберт Гор у 1992 р. організував у сенаті США слухання на тему: «Нові технології для стійкого розвитку». Виступали кращі американські фахівці, зокрема Е. Дрекслер. У своїй блискучій промові, в якій він цитував багатьох видатних вчених, у тому числі Р. Фейнмана, та під час відповідей на запитання Е. Дрекслера переконав сенаторів у необхідності розробки і затвердження спеціальної програми з нанотехнологій. Того ж року новий президент США Білл Клінтон зобов'язав віце-президента Альберта Гора опікуватися розвитком нових нанотехнологій. У 1994 р. А. Гор виніс на всенародне обговорення документ під назвою «Наука на службі народу». Його ідеї та пропозиції зацікавили директора наукового відомства «Національний фонд науки» (NSF), професора з Університету Райса у штаті Техас Ніла Лейна (з 1998 р. радника президента Б. Клінтона з науки), та керівника відділу проектування цієї установи Майкла Роко, а також радника президента з економічних питань. У березні 1999 р. було оголошено про створення спеціальної програми «Національна нанотехнологічна ініціатива» (NNI), яку затвердив конгрес США, виділивши на її здійснення 500 млн доларів. Щорічно бюджет NNI зростає: у 2005 р. він становив 970 млн, а в 2008 р. — вже 1,447 млрд доларів. Нині NNI об'єднує основні напрями досліджень з нанотехнологій у США. Разом з цим затверджені й інші програми з нанотехнологій.

Наприкінці 80-х — на початку 90-х років ХХ ст. починається інтенсивний розвиток нанонауки, нанотехнологій, наномедицини, нанофармакології, нанофармації та суміжних галузей. Активне вивчення властивостей наночастинок нарешті сприяє впровадженню результатів досліджень у різні галузі народного господарства [10; 11].

Р. Фейнман також стверджував, що можна отримати значно більше за умов наявності відповідної апаратури, зокрема мікроскопів. Відомо, що перший електронний мікроскоп розробили у 1931 р. М. Кноль і Е. Руска: він значно розширив можливість дослідження мікророзмірів у техніці, біології та медицині. Але такий прилад не відпо-

відав потребам дослідників, які вивчали наночастинки. Тому значним досягненням у цьому напрямі була розробка фірмою Carl Zeiss нового електронного мікроскопа "LIBRA 200FE", який давав змогу досліджувати частинки розміром менше 0,14 нм. У 2005 р. фірма Carl Zeiss повідомила про створення трансмісійного електронного мікроскопа (УНРТЕМ) з ультрависокою роздільною здатністю. Прилад може аналізувати субанстремні роздільності величиною 0,08 нм і навіть 0,07 нм.

«На жаль, сучасні мікроскопи не мають таких можливостей. Сконструйте мікроскоп у 100 разів досконалішим і багато проблем у біології виглядатимуть значно простішими» зауважував у знаменитій лекції Р. Фейнман [7]. Це був перший поштовх, який виявився надзвичайно потужним. На початку 80-х років ХХ ст. скануюча зондова мікроскопія досягла атомного рівня, що дало змогу маніпулювати не тільки окремими атомами, а й збирати конструкції шляхом додавання атома за атомом. Наприкінці ХХ ст. був сконструйований електронний мікроскоп, завдяки якому можна було побачити окремі атоми. Як відмічено раніше, прилади для досліджень наночастинок розробили в швейцарських лабораторіях ІВМ: у 1982 р. створений растровий тунельний мікроскоп, а в 1986 р. — атомно-силовий мікроскоп. Це сприяло прискоренню досліджень у галузі нанонауки і реалізації на практиці передбачення Річарда Фейнмана.

Коли у 1959 р. англійський біофізик і генетик Френсис Крік, американський біохімік Джейн Вотсон і англійський біофізик Моріс Уїлкінс ще тільки розпочинали дослідження зі встановлення структури ДНК, Р. Ф. Фейнман уже передбачив можливість такого відкриття. Через три роки, у 1962-му, Ф. Кріку, Д. Вотсону і М. Уїлкінсу присудили Нобелівську премію в галузі фізіології і медицини «За відкриття молекулярної структури нуклеїнових кислот та їх значення в передачі інформації у живій матерії» (відомій у науковій літературі як «подвійна спіраль») [12; 13].

Доповідь-лекція Р. Ф. Фейнмана сприяла розгортанню інтенсивних досліджень з молекулярної біології, біотехнологій, квантової хімії, генетики. Нобелівські премії отримують: у 1964 р. англійський учений Д. К. Ходжкін — «За визначення за допомогою рентгенівських променів структури біологічно активних речовин», у 1972 р. американський учений К. Б. Анфінсен — «За роботи з дослідження рибонуклеази, особливо зв'язку між амінокислотною послідовністю і біологічно активною конформацією», у 1980 р. американський учений П. Берг — «За фундаментальні роботи з біохімії нуклеїнових кислот, особливо рекомбінантної ДНК», у 1989 р. канадський учений С. Олтмен і американський Т. Р. Чек — «За відкриття каталітичних властивостей РНК», у 1993 р. канадський вчений М. Сміт — «За фундамен-

тальні дослідження зі спрямованого мутагенезу, що ґрунтується на олігонуклеотидах та його вплив на розвиток вивчення про білок» та ін.

Дослідження з нанонауки і нанотехнологій можна поділити на емпіричні та наукові. Продукти нанотехнологій — на природні та синтетичні. Молекули, подібні до вуглецевих наночастинок (наприклад фулерени), є у живій природі. Фулереноподібну структуру мають деякі віруси (герпес, поліомієліт, імунodefіцит та ін.), морські одноклітинні мікроорганізми — радіолярії. Це унікальні планктонні морські організми розміром від 40 мкм до 1 мм, що будують свій скелет із солей нанокремнію. Органічні речовини радіолярій нагадують структуру фулерену. Фулеренову структуру мають і бактеріофаги (з грец. *bacteria* — палочка; *phagos* — пожирає бактерій). Відкривач бактеріофагів Ф. Д'Ерелль, характеризуючи їхню властивість знищувати мікроорганізми, згадував відоме прислів'я: «Ворог твого ворога — твій друг». Приклади емпіричного періоду застосування нанотехнологій за часів, коли людство про це навіть не здогадувалося, — отримання кольорового скла, глиняних та керамічних виробів у Стародавній Греції, Римі, Єгипті, Київській Русі. Синтетичними наноматеріалами є: дендримери, фулерени, нанометали, наностержні, нанотрубки, нанодротинки, нанопорошки, нанокільця, наноскорини, нановолокна, нанопояси, нанокapsули та ін. [14–17].

Інтенсифікація фундаментальних досліджень, розробка і впровадження нанотехнологій у практичну діяльність людини сприяли появі вже згаданого часопису “Nanotechnology”, а також нових журналів — “Journal Nanoscience Nanotechnology”, “National Nanotechnology”, “Nano Letters”, “Nanomedicine”, “Small”, “Lab Chip”. “Langmuir”, “IEE Proceedings Nanobiotechnology”, “Journal Biomed. Nanotechnology”, “Nano Today”, “ACS Nano”, “Nano Research”, “Nanoscale” та інших видань.

Для ефективного використання результатів нанотехнологій майже в усіх країнах світу створюють спеціальні лабораторії, центри, інститути, комітети та інші установи (як державні, так і приватні). У США в 2000 р. засновано науковий центр «Національна нанотехнологічна ініціатива», де зосереджено основні дослідження з цього напрямку. Стрімко прогресує нанонаука в Японії, де фірми розвивають і вдосконалюють методики у галузі мікроскопії.

У Європейському союзі також приділяють чільну увагу розвитку нанотехнологій. У 2004 р. провідні європейські компанії, зокрема IBM, “Nokia”, FVD, “Ericsson”, ASML, “Nano-Life” та інші, ухвалили рішення про щорічне інвестування не менше ніж 6 млрд доларів США на розробки нанотехнологій. Нідерландський холдинг — лідер у галузі імерсійної літографії — та компанія IBM спільно вклали 400 млн доларів у створен-

ня науково-дослідного центру у місті Олбані (штат Нью-Йорк) для проведення досліджень з нанотехнологій. У консорціумі “Nano-Life”, який заснований у 2004 р., беруть участь учені й організації з Австрії, Данії, Німеччини, Греції, Ізраїлю, Голландії, Франції, Швеції та інших країн, а також промислові компанії, регіональні наукові центри, наукові лабораторії. Нині майже 4 тис. компаній здійснюють науково-прикладні дослідження з нанотехнологій, виробляють нанопродукти органічного й неорганічного походження.

Також чимало світових компаній щедро інвестують у нанотехнологічні проекти. Наприклад, компанія “Dow Chemical”, із щорічним обсягом продажу продукції близько 33 млрд доларів США і клієнтами у 180 країнах світу, об'єднала свої зусилля з компанією “Starpharma” (Мельбурн, Австралія) і компанією “Dendritic NanoTechnologies, Inc” (DNT) для розробки нанопродуктів за допомогою наномасштабних полімерів. Компанія DNT отримала більше 30 патентів на дендримери й продала ліцензії на понад 200 типів цих структур іншим фармацевтичним, діагностичним і біотехнологічним компаніям. Компанія DNT розробляє продукти для роботи з білками й антитілами, створення протизапальних лікарських засобів, цільового надходження препаратів до осередку патологічного процесу, нанодіагностики різних захворювань. У 2004 р. створено Європейську дорадчу раду в галузі наноелектроніки (European Nano-Electronics Initiative Advisory Council).

У Російській Федерації діє «Комітет з нанотехнологій» при президенті країни, затверджена державна програма «Стратегія розвитку наноіндустрії». Головною організацією з її реалізації визначено Російський науковий центр «Курчатовський інститут». На розвиток цих досліджень виділяються значні кошти, створюються творчі колективи, інститути, лабораторії, центри, фірми.

В Україні також проводять наукові розробки у галузі нанонауки та нанотехнологій. У Національній академії наук України, у межах спеціальної програми «Наноструктурні системи, наноматеріали, нанотехнології», тривають дослідження з фізики металів і сплавів, хімії поверхні, порошкових технологій, мікроелектроніки, колоїдних нанорозчинів, сорбентів, лікарських засобів тощо. Міністерством освіти і науки України спільно з Міністерством промислової політики затверджено Українсько-російську міжвідомчу науково-технічну програму «Нанофізика і наноелектроніка». Застосування наноматеріалів у клінічній практиці вивчають в інститутах Академії медичних наук України, національних та медичних університетах країни.

Останнім часом інститути НАН України та НАМН України активізували вивчення фізичних, фізико-хімічних, біохімічних основ нанонауки. [18–23]. Так, в Інституті металофізики іме-

ні Г. В. Курдюмова (директор — академік НАН України А. П. Шпак) розроблені методи одержання нанорозмірних дисперсних систем за допомогою електровибуху провідників та електричного пробою рідких середовищ. Ця методика дає змогу отримувати нанопорошки металів, а також вуглецеві наноматеріали: наноалмази, нанотрубки та фулерени. Встановлена висока сорбційна активність нанодисперсного апатиту кальцію, який може застосовуватися як трансплантат при переломах кісток. Виявлено ранні стадії кристалізації в аморфних стрічках. Однією зі структурних складових сплавів системи Fe-Si-B у рідкому та аморфному станах є кристалічні кластери розміром 3–4 нм. На базі цього академічного інституту проводяться міжнародні конференції з нанотехнологій, на яких узагальнюють результати досліджень з нанонауки, отримані в усіх країнах світу.

В інституті фізики НАН України (директор — чл.-кор. НАН України І. О. Солошенко) розроблено метод створення штучних наноструктур за допомогою стимульованих електричним полем поверхневих хімічних реакцій на інтерфейсі рідина-грань (III) золота (академік НАН України А. Г. Наумовець і проф. О. А. Марченко), що має важливе значення для виявлення високої активності нанорозмірних частинок цього металу. У процесі дослідження міжчастинкової взаємодії орієнтованих анізотропних феромагнітних наночастинок встановлено виникнення коерцитивного поля з формуванням «супермагнітного» стану з корельованим напрямком магнітних моментів (чл.-кор. НАН України С. М. Рябченко і співавт.).

В Інституті фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України була з'ясована екситонна природа переходів у гетероструктурах із квантовими точками InAs-InP та ідентифіковані екситони, що формуються за участі важких і легких діркових станів (академік НАН України М. П. Лисиця і співавт.). За допомогою розробленої технології формування люмінесціюючих Si-нанокластерів встановлено значне збільшення концентрації випромінюючих центрів при відпаді в атмосфері H_2 або O_2 , що дозволяє приблизно на порядок збільшити інтенсивність свічення (чл.-кор. НАН України В. Г. Литовченко і співавт.). За допомогою поляризаційної модуляції випромінювання встановлені особливості поверхневого плазмового резонансу в нанорозмірних плівках золота, нанесених на поверхню призми повного внутрішнього відбиття (Б. К. Сердега і співавт.).

Українські вчені відомі своїми дослідженнями з вивчення властивостей наноструктур кремнію. Отримано цікаві дані про можливість керування характеристиками саморганізованих Si-Ge наноструктур шляхом зміни традиційного ненапруженого кремнієвого буферного шару (чл.-кор. НАН

України М. Я. Валах і співавт.). Це зумовлює зміну розміру, форми, поверхневої щільності та компонентного складу сформованих наночастинок.

У Донецькому фізико-технічному інституті імені О. О. Галкіна НАН України (чл.-кор. НАН України В. М. Варюхін) встановлені якісні зміни властивостей кобальтиту лантану при переході до нанорозмірних частинок. Це дає підстави стверджувати, що магнітний стан кобальтиту лантану визначають розміри його елементарної поверхні.

В Інституті магнетизму НАН і МОН України (директор — академік НАН України В. Г. Бар'яхтар) встановлено, що зміни амплітуд осциляцій викликає також зміни осциляцій гігантського магнетоопору в металевих магнітних наноструктурах. Такий ефект спостерігається в дво- і тришарових плівках ФМ/РЗМ при зміні в них товщини немагнітних металевих прошарків (чл.-кор. НАН України А. М. Погорілий, В. Ф. Лось).

У науково-технічному комплексі «Інститут монокристалів» (директор — академік НАН України В. П. Семиноженко) розроблено наноматеріали, які можна застосовувати в медичній практиці та фармації.

Результати досліджень українських учених дедалі активніше реалізуються на практиці. Так, Інститут хімії поверхні імені О. О. Чуйка НАН України (директор — чл.-кор. НАН України М. Т. Картель) спільно з вітчизняними науково-медичними закладами вперше у світі розробив, дослідив і впровадив у медичну практику новий препарат сорбційно-детоксикаційної дії на основі нанокремнезему — Силікс [21]. На кафедрі фармакології та клінічної фармакології Національного медичного університету імені О. О. Богомольця розроблено нову лікарську форму — суспензію нанодисперсного кремнезему. Вона мінімізує токсичність і негативний вплив на функцію печінки таких сполук, як натрію фторид та натрію нітрит, а також протитуберкульозних препаратів — ізоніазиду, піразинаміду, етамбутолу, що різняться механізмом негативного впливу на організм і хімічною структурою. За фармакологічною активністю суспензія нанодисперсного кремнезему перевищує препарати звичайного кремнезему [24].

В Інституті експериментальної патології, онкології і радіобіології імені Р. Є. Кавецького (директор — академік НАН України В. Ф. Чехун) спільно з Інститутом електрозварювання імені Є. О. Патона розробляють нові варіанти колоїдних систем з магнітними наночастинами Fe_3O_4 з метою створення протипухлинних препаратів [25]. Науковці Інституту епідеміології та інфекційних хвороб імені Л. В. Громашевського НАМН України (директор — проф. В. Ф. Марієвський) спільно з дослідниками лабораторії електронно-променевої технології неорганічних матеріалів

для медицини Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона (директор — акад. Б. Є. Патон) і Національного медичного університету імені О. О. Богомольця встановили, що наночастинки срібла та міді виявляють більш виражену протимікробну дію щодо *Staphylococcus aureus*, ніж звичайні препарати цих металів.

Майже півстоліття тривають дослідження з нанотехнологій в Інституті загальної та неорганічної хімії імені В. І. Вернадського НАН України (директор — академік НАН України С. В. Волков). Тут винайшли технологію синтезу дрібнодисперсних систем з сажі (згодом її назвали нанотрубками) і методику розчинення металів у полімерному середовищі, яку застосовують у магнітному записі інформації та для одержання наночастинок.

Тривають дослідження з нанотехнологій в інших Інститутах НАН України: фізичної хімії імені Л. В. Писаржевського (директор — академік НАН України В. Д. Походенко), фізико-технічному інституті низьких температур імені Б. І. Веркіна (директор — чл.-кор. НАН України С. Л. Гнатченко), проблем матеріалознавства імені І. М. Францевича (директор — академік НАН України В. В. Скороход), біохімії імені О. В. Палладіна (директор — академік НАН України С. В. Комісаренко), фізико-хімічному інституті імені О. В. Богатського (директор — академік НАН України С. А. Андронаті).

Такі дослідження продовжуються вченими НАН України та НАМН України [23]. В Інституті фізики НАН України встановлено, що формування наночастинки берилію при адсорбції кисню на поверхні грану молібдену з берилієвим покриттям, товщина якого більше одного моношару, синтез BeO відбувається вже за умов кімнатної температури. Отримані результати досліджень матеріалів важливі для конструювання першої стінки термоядерної реакції (академік НАН України А. Г. Наумовець, О. Г. Федорус, О. О. Мітрянєв, В. В. Петрова). У цьому інституті чл.-кор. НАН України П. М. Томчуком побудована теорія залежності декременту згасання дипольних плазмових резонансів від форми металічних наночастинок, розміри яких менше за довжину вільного пробігу електрона. Декремент визначає локальні електричні поля, які можна збудити біля поверхні металічних наночастинок. Наявність цих полів можна широко застосовувати у різних методах діагностики, наприклад, у біології з метою використання малих концентрацій біологічно активних макромолекул.

В Інституті фізичної хімії імені Л. В. Писаржевського НАН України вперше показано, що процеси електрохімічної активації фреонів С-2 на наноструктурованих електродах $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}$ характеризуються значно вищими струмами і зміщенням потенціалів пікових струмів у менш негативну область, а електрохімічне відновлення фреонів

С-2 на таких електродах у присутності діоксиду вуглецю призводить до ефективного одностадійного утворення важливих фторвмісних пропіонових кислот у звичайних умовах. Отримані результати мають значення для застосування в хімічній промисловості (академік НАН України В. Г. Кошечко). У цьому інституті одержані важливі гібридні наноконpozити зі структурою ядро-оболонка на основі LiFePO_4 та поліаніліну, які можна широко використовувати як катод у промислових літієвих акумуляторах, що мають значно кращі електрохімічні характеристики. Дослідники встановили, що наявність шару поліаніліну на поверхні LiFePO_4 не тільки сприяє підвищенню електропровідності наноконpozитного матеріалу, але й полегшує інтеркаляцію іонів літію в структуру LiFePO_4 при заряді-розряді (академік НАН України В. Д. Походенко, академік НАН України В. Г. Кошечко).

В Інституті хімії поверхні імені О. О. Чуйка розроблено оригінальну технологію синтезу комбінованих сорбентів на базі лігноцелюлозної матриці та введення нанокластерів фероціанідів d — металів, які мають селективну дію при поглинанні радіоцезію зі складних рідинних середовищ. Отримані сорбенти є біосумісними із живими організмами і зберігають високу сорбційну активність щодо різних екзотоксинів органічного та неорганічного походження (академік НАН України М. Т. Картель). У цьому інституті розроблені методи одержання препаратів біомедичного призначення на основі нанорозмірних частинок золота, срібла, міді та конpozитів їх біметалів, імпрегнованих у дисперсні носії та тканини, з вираженими бактерицидними протигрибковими та протипухлинними властивостями, які застосовують як альтернативу антибіотикам (Г. М. Єременко, І. С. Петрик).

Вперше, використовуючи квантово-хімічні методи, в Інституті сорбції та проблем ендоекології НАН України обґрунтовано моделювання вуглецевих наноматеріалів графеновими кластерами з відкритими електронними оболонками. Отримані результати дали можливість впливу на процеси формування вуглецевих наноконpozитів, зокрема активованого вугілля (академік НАН України В. В. Стрелко).

Академіком НАН України В. Г. Білоусом в Інституті загальної та неорганічної хімії імені В. І. Вернадського були проведені дослідження з вивчення механізмів втрати енергії в системах на основі суперпарамагнітних наночастинок (Fe_3O_4 , CoFe_2O_4 , $(\text{La},\text{Sr})\text{MnO}_3$) під впливом зовнішнього зміненого магнітного поля. Це дозволило оптимізувати умови одержання стабільних нетоксичних магнітних дисперсних наночастинок, що застосовують у медичній практиці як локальні індуктори гіперемії злоякісних пухлин.

В Інституті біоколоїдної хімії імені Ф. Д. Овчаренка НАН України розроблений оригіналь-

ний гетерокоагуляційний механізм взаємодії вуглецевих наночастинок і нанопластинок лапоніту у водних суспензіях, визначені умови стійкості суспензій. На основі суміші нанотрубок і нанопластинок виготовлено гібридний адсорбент та визначені його адсорбційні властивості (проф. М. І. Лебовко). У цьому ж інституті (З. Р. Ульберг і Т. Г. Грузіна) розроблені науково-практичні рекомендації для застосування наночастинок металів у виробництві мультикомпонентних вакцин з метою специфічної профілактики особливо небезпечних аеробних й анаеробних інфекцій тварин.

В інституті органічної хімії НАН України спільно з Інститутом біохімії імені О. В. Палладіна НАН України (академік НАН України С. О. Костерин) та кафедрою медичної хімії Харківського національного медичного університету (Г. О. Сирова), а також іншими науковими колективами проводяться фундаментальні дослідження з вивчення різноманітних властивостей. Член-кореспондент НАН України В. І. Кальченко і С. Г. Харченко отримали нові оригінальні типи нанорозмірних функціональних матеріалів на основі макроциклічних чашоподібних сполук — тіакаліксаренів з активними природними замісниками.

Член-кореспондент НАН України В. В. Шевченко і співавтор в Інституті хімії високомолекулярних сполук НАН України розробили метод отримання наночастинок поліедральних олігосилсесквіоксанів з ненасиченими, гідроксильними або кислотними групами. Здатність даних олігомерів до підвищення термічної й хімічної стійкості полімерних нанокompatитних матеріалів відкриває перспективність їх ефективного використання як модифікуючих добавок для створення термічних електроізоляційних матеріалів.

В Інституті біоорганічної хімії та нафтохімії НАН України розроблено нові нанокompatити вуглецевих нанотрубок з поліпіролом із різними сполуками, що можуть бути використані як сенсорні матеріали для електромагнітного й антистатичного захисту (О. А. Пул, П. О. Огурцов, Ю. В. Носков).

В Інституті електрозварювання НАН України імені О. Є. Патона (директор — академік НАН України Б. Є. Патон) розроблена оригінальна нанотехнологія отримання наночастинок (академік НАН України Б. О. Мовчан) [26].

Завдяки дослідженням, проведеним спільно з науковцями лабораторії Електронно-променевої технології неорганічних матеріалів для медицини (завідувач — академік НАН України Б. О. Мовчан) Інституту електрозварювання імені О. Є. Патона НАН України (директор — академік НАН України Б. Є. Патон), Інституту епідеміології та інфекційних хвороб імені Л. В. Громашевського НАМН України (директор — проф. В. І. Задорожна, завідувачі лабораторії вірусології проф. С. Л. Рибалко та протимікробних препаратів проф.

В. Ф. Марієвський), Національної медичної академії післядипломної освіти імені П. Л. Шупика (ректор — академік НАМН України Ю. В. Вороненко, завідувачка кафедри фармацевтичної технології і біофармації — проф. Л. Л. Давтян), кафедри фармакології (завідувач — чл.-кор. НАН України І. С. Чекман) Національного медичного університету імені О. О. Богомольця вперше в світі були вивчені властивості наноміди та наносрібла, а також їх композитів, що мають проти-вірусну активність.

Модифіковані полівінілпіролідом наночастинки міді та композити міді у поєднанні зі сріблом ефективно пригнічують репродукцію вірусів грипу, герпесу та сурогатного вірусу гепатиту С — вірусу бичачої вірусної діареї *in vitro* та *in vivo*. Найбільшу ефективність модифіковані полівінілпіролідом наночастинки міді та композити міді зі сріблом проявили в рамках експериментальної моделі грипозної інфекції *in vitro* та *in vivo*. Механізм дії модифікованих наночастинок міді та композитів міді зі сріблом полягає у блокуванні синтезу РНК вірусів. Такі показники антивірусної дії як цитотоксичність (CC_{50}), ефективна доза (ED_{50}) та індекс селективності (IS) були однаковими для всіх експериментальних вірусних інфекцій (грипу, герпесу та сурогатного вірусу гепатиту С (ВБВД)), що говорить про їх ефективність на цих моделях вірусів та однаковий механізм антивірусної дії.

Також було розроблено лабораторну технологію отримання лікарських форм нанометалів для зовнішнього (мазь, гель), перорального (таблетки, капсули, сироп), внутрішньовенного (розчини для ін'єкцій) застосування. У світі поки що немає нанопрепаратів для парентерального застосування.

Розробки у сфері військових нанотехнологій є перспективними для медицини та фармакології. Наночастинки вже почали знаходити застосування як новітні лікарських засоби. Українськими ученими (академік НАН України О. О. Чуйко, проф. В. О. Пентюк) вперше у світі був розроблений препарат нанодисперсного кремнезему — силікс, який застосовується як сорбент для лікування отруєнь. Розроблена нова оригінальна технологія отримання композиту нанодисперсного кремнезему з наносріблом, який проявляє виражену сорбційну активність, а також протимікробну дію (Інститут хімії поверхні імені О. О. Чуйка НАН України, завідувач лабораторії — проф. Є. П. Воронін). Такий композит можна застосовувати при отруєннях, причиною яких є інфекційний чинник, а також очищати воду від токсичних речовин і мікроорганізмів у польових умовах. В Інституті медицини праці НАМН України, Інституті біоколоїдної хімії імені Ф. Д. Овчаренка НАН України, Національному медичному університеті імені О. О. Богомольця розроблені та затверджені на засіданні Науково-експертної

ради Державного експертного центру МОЗ України від 26.09.2013 р. методичні рекомендації «Оцінка безпеки лікарських нанопрепаратів».

За результатами, що були отримані вченими України, встановлено, що наночастинки міді, срібла та заліза у певних дозах не проявляють мутагенної й цитотоксичної дії; наномідь і нанозалізо класифікуються як нетоксичні, наносрібло — помірно токсичні речовини. Наночастинки міді, срібла виявляють виражену протимікробну, протівірусну дію, в тому числі й до антибіотикорезистентних штамів. Ці надзвичайно важливі властивості досліджуваних наночастинок срібла, міді можна буде застосовувати для лікування ран у хворих та поранених.

Наномідь, наносрібло можуть застосовувати для лікування інфекційних хвороб, викликаних стафілококами, стрептококами, пневмококами, синьогнійною паличкою, патогенними грибами, вірусами грипу, герпесу, гепатиту, мікобактеріями туберкульозу, в тому числі мікроорганізмами, що є стійкими до дії різних хіміотерапевтичних препаратів, зокрема антибіотикорезистентними штамми. Нанозалізо проявляє виражений протіанемічний ефект при залізодефіцитних анеміях різного генезу.

Наномідь, наносрібло, нанозалізо, враховуючи їх безпечність та високу клінічну ефективність, доцільно застосовувати у бійців АТО, які отримали травми або захворіли на інфекційні хвороби, анемію, при отруєннях.

Впровадження результатів цих досліджень у медичну практику, в тому числі у військову медицину, сприятиме значному покращанню лікування хворих на інфекційні, в тому числі вірусні, захворювання, анемії, гнійні рани. Застосування наночастинок заліза сприятиме значному підвищенню ефективності лікування гіпохромних анемій різного генезу, а при поєднаному застосуванні з іншими засобами базисної терапії — станів після крововтрати.

Співробітниками Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона НАН України (директор — акад. Б. Є. Патон), Інституту хімії поверхні імені О. О. Чуйка НАН України (директор — акад. М. Т. Картель), Інституту біологічної хімії імені Ф. Д. Овчаренка НАН України (директор — проф. З. Р. Ульберг) отримані нанометали міді, срібла, заліза, кремнезему, які можна запровадити у виробництві для створення нових високо-ефективних препаратів для лікування отруєнь, ран, інфекційних та вірусних захворювань.

Українськими ученими були проведені фундаментальні та прикладні дослідження технологічних, лікувальних і токсикологічних властивостей нанометалів — міді, срібла, заліза, кремнезему.

Зазначені установи, а також науковці лабораторії Електронно-променевої технології неорганічних матеріалів для медицини (завідувач — акад. Б. О. Мовчан) Інституту електрозварюван-

ня імені Є. О. Патона НАН України (директор — акад. Б. Є. Патон), Інституту хімії поверхні імені О. О. Чуйка НАН України (директор — акад. М. Т. Картель, професори Г. М. Єременко, Є. П. Воронін), Інституту біологічної хімії імені Ф. Д. Овчаренка НАН України (директор — проф. З. Р. Ульберг, канд. біол. наук Т. Г. Грузіна), Інституту медицини праці НАМН України (директор — акад. Ю. І. Кундієв, акад. І. М. Трахтенберг), Інституту урології НАМН України (директор — чл.-кор. НАМН України С. О. Возіанов, завідувачка лабораторії мікробіології — проф. А. В. Руденко), Інституту епідеміології та інфекційних хвороб імені Л. В. Громашевського НАМН України (директор — проф. В. І. Задорожна, завідувачі лабораторії вірусології проф. С. Л. Рибалко та протимікробних препаратів проф. В. Ф. Марієвський), Інституту фармакології і токсикології НАМН України (директор — чл.-кор. НАМН України Т. А. Бухтіарова), Інституту гігієни та медичної екології імені О. М. Марзєєва НАМН України (директор — академік НАМН України А. М. Сердюк, проф. В. М. Бабій), кафедри фармакології (завідувач — чл.-кор. НАН та НАМН України І. С. Чекман), а також кафедри технології ліків (доц. Ж. М. Полова) Національного медичного університету імені О. О. Богомольця, Національної медичної академії післядипломної освіти імені П. Л. Шупика (ректор — академік НАМН України Ю. В. Вороненко, завідувачка кафедри технології ліків і біофармації фармацевтичної технології і біофармації проф. Л. Л. Давтян), Львівського національного медичного університету імені Данила Галицького (ректор — чл.-кор. НАМН України Б. С. Зіменьковський, завідувачка кафедри технології ліків і біофармації — доц. С. Б. Білоус), Одеського національного медичного університету (чл.-кор. НАМН України В. Й. Кресюн, проф. В. О. Ульянов), Дніпропетровської державної медичної академії (ректор — академік НАМН України Г. В. Дзяк, завідувачка кафедри медичної біології, фармакогнозії та ботаніки проф. В. Ф. Шаторна, проф. О. О. Савенкова), Київського національного університету імені Тараса Шевченка (завідувач кафедри фізики функціональних матеріалів — чл.-кор. НАН України М. П. Куліш, доц. О. П. Дмитренко), Національного фармацевтичного університету (ректор — академік НАН України В. П. Черних, професори І. А. Зупанець, С. Ю. Штриголь) мають досвід вивчення і розробок нанотехнологій та впровадження їх у медичну практику.

Останнім часом у світі велику увагу приділяють вивченню корпускулярних та хвильових властивостей наноматеріалів. Зі зменшенням розмірів наноструктур більшого значення набувають хвильові ефекти наноматеріалів. Автор вважає, що переважання хвильових властивостей у наноматеріалах над корпускулярними речовинами

зумовлює значну зміну їх фізико-хімічних властивостей та підвищення фізичної, механічної, біологічної, фармакологічної і токсикологічної активності. Не усі зазначені у статті положення експериментально підтверджені, деякі потребують додаткових досліджень фахівців різних спеціальностей. Міждисциплінарні дослідження сприятимуть встановленню особливих властивостей наноматеріалів.

Запропонована оглядова стаття не претендує на повноту висвітлення історії проблем нанонауки. Автор з вдячністю прийме і врахує усі зауваження читачів щодо удосконалення статті новими даними, що стосуються нанонауки.

Завершу статтю словами англійського вченого-гуманіста Ф. Бекона (1561–1626): «Природу можна підкорити тільки її власними знаряддями. Але найкращий спосіб підкорити природу — підкоритися їй».

ЛІТЕРАТУРА

1. Чекман І. С. Історія лікознавства / Чекман І. С. – К. : Задруга, 2014. – 256 с.
2. Uskoković V. I. Entering the era of nanoscience: time to be so small / V. I. Uskoković // J. Biomed. Nanotechnol. – 2013. – N 9. – С. 1441–1470.
3. Жоаким К. Нанонауки. Невидимая революция / К. Жоаким, Л. Плевр. – М. : КоЛибри, 2009. – 240 с.
4. Taniguchi N. On the basic Concept of “Nanotechnology” // Presented Proc. ICPE. – 1974.
5. Грибин Д. Ричард Нейман: жизнь в науке / Д. Грибин, М. Грибин. – М. ; Ижевск : Ин-т компьютерных исследований, 2002. – 288 с.
6. Фейнман Р. Ф. Фейнмановские лекции по физике. Излучение. Волны. Кванты / Р. Ф. Фейнман, Р. Б. Лейтон, М. Сэндс ; под ред. Я. А. Смородинского. – 4-е изд., испр. – М. : Едиториал УРСС, 2004. – 152 с.
7. Фейнман Р. Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики / Р. Фейнман // Российский химический журнал. – 2002. – Т. XLVI, № 5. – С. 406–409.
8. Drexler K. E. Engines of creation: The coming era of nanotechnology. Anchor / К. Е. Drexler. – 1987. – 320 p.
9. Drexler K. E. Nanotechnology: the past and the future / К. Е. Drexler // Science. – 1992. – Vol. 255, N 5042. – P. 268–269.
10. Нанотехнологии и перспективы их использования в медицине и биотехнологии / В. М. Лахтин, С. С. Афанасьев, М. В. Лахтин [и др.] // Вестник РАМН. – 2008. – № 4. – С. 50–55.
11. Нанофармакологія: стан та перспективи наукових досліджень / І. С. Чекман, О. В. Ніцак // Вісник фармакології та фармації. – 2007. – № 11. – С. 7–10.
12. Чекман І. С. Родина Нобелів / І. С. Чекман. – К. : НПВ «Задруга», 2007. – 152 с.
13. Довгий С. О. Лауреати Нобелівської премії 1901–2001 : енциклопедичний довідник / С. О. Довгий, В. М. Литвин, В. Б. Солоіденко. – К. : Укр. видавничий центр, 2001. – 768 с.
14. Nanoparticles: pharmacological and toxicological significance / С. Medina, M. J. Santos-Martinez, A. Radomski [et al.] // Br. J. Pharm. – 2007. – Vol. 150, N 5. – P. 552–558.
15. Суздаев И. П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов / И. П. Суздаев. – М. : КомКнига, 2006. – 592 с.
16. Пул Ч. Нанотехнологии / Ч. Пул, Ф. Оуенс. – 2-е изд., доп. – М. : Техносфера, 2006. – 336 с.
17. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – 2-е изд., испр. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 416 с.
18. Горбик П. П. Физико-химические и медико-биологические аспекты создания полифункциональных нанокомпозиций и нанороботов / П. П. Горбик, В. Ф. Чехун, А. П. Шпак // Наноразмерные системы. Будова-властивості-технології : тези конф. – К., 2007. – С. 422.
19. Адресна доставка наносистемами лікарських засобів до головного мозку / М. Головенко, В. Ларіонов // Вісник фармакології та фармації. – 2008. – Т. 4. – С. 8–16.
20. Нанохімія. Наносистеми. Наноматеріали / С. В. Волков, С. П. Ковальчук, В. М. Генко, О. В. Решетняк. – К. : Наукова думка, 2008. – 422 с.
21. Медицинская химия и клиническое применение диоксида кремния / А. А. Чуйко, В. К. Погорелый, А. А. Пентюк [и др.] – К. : Наукова думка, 2003. – 415 с.
22. Шпак А. П. Звіт про діяльність Національної академії наук України у 2008 році / А. П. Шпак. – К., 2009. – 298 с.,
23. Богданов В. Л. Звіт про діяльність Національної академії наук України за 2015 рік / В. Л. Богданов ; НАН України. – К. : Академперіодика, 2016. – 556 с.
24. Ніцак О. В. Ефективність суспензії нанодисперсного кремнезему при гепатиті, викликаному ізоніазидом / О. В. Ніцак, Л. І. Казак, І. С. Чекман // Фармакологія та лікарська токсикологія. – 2008. – № 1/3. – С. 66–69.
25. Нанонаука і нанотехнології: технічний, медичний та соціальний аспекти / Б. Є. Патон, В. Ф. Москаленко, І. С. Чекман, Б. О. Мовчан // Вісник НАН України. – 2009. – № 6. – С. 18–26.
26. Мовчан Б. А. Электронно-лучевая гибридная нанотехнология осаждения неорганических материалов в вакууме / Б. А. Мовчан. – К. : Академперіодика, 2008. – Т. 1. – С. 227–247.

Надійшла 13.03.2017

Рецензент д-р мед. наук, проф. В. Й. Кресюн