

Перспективи конвергенції NBIC-технологій у медицині

Автори: Кутько І.І., д.м.н., професор, Матюшенко І.Ю., к.т.н., професор, ДЗ «Інститут неврології, психіатрії та наркології НАМН України, Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна

Разделы: Справочник специалиста



КУТЬКО І.І.,
д.м.н., професор



МАТЮШЕНКО І.Ю.,
к.т.н., професор

Сьогодні більшість експертів у галузі стратегічного планування, науковотехнічної політики та інвестування чітко визначають, що у найближчому майбутньому людство чекає нанореволюція у всіх галузях науки, виробництва, медицини, національної безпеки, побуту, відпочинку і розваг. При цьому її наслідки будуть ще більш масштабними і якісно новими, ніж від комп'ютерної революції останньої третини ХХ століття та біотехнологічної революції останнього десятиліття минулого століття. Крім того, бурхливий прогрес на початку ХХІ століття когнітивної науки — міждисциплінарної галузі досліджень, що вивчає закономірності одержання, зберігання і використання знань людства, — оцінюється багатьма вченими як початок нової наукової революції. Саме нанотехнології стають тією з'єднуючою ланкою між іншими революційними технологічними напрямками, які виникли за останні 20–30 років, і дозволяють одержати якісно нові можливості від конвергенції цих напрямів і розвитку кожного з них для всіх сфер суспільного життя.

Вперше думка про те, що в майбутньому людство зможе створювати будьякі об'єкти, навчившись маніпулювати окремими атомами (тобто використовувати їх як звичайний будівельний матеріал), була чітко сформульована у грудні 1959 р. у славнозвісній лекції професора Каліфорнійського технологічного інституту Річарда Філіпа Фейнмана «Там унизу багато місця» [1]. У цій лекції Фейнман відмітив, що *біологічні системи виробляють функціонуючі нанопристрої*, починаючи з самого виникнення життя, і людство може взяти з біології багато нових ідей про їх створення.

За останні тридцять п'ять років з'явилася безліч визначень нанотехнологій. Наприклад, у документах державної програми США «Національна нанотехнологічна ініціатива» є розгорнуте визначення,

сформульоване авторитетними спеціалістами [2]: «*Нанотехнології — це дослідження і технологічні розробки на атомарному, молекулярному або макромолекулярному рівні в шкалі розмірів приблизно від 1 до 100 нм, що проводяться для одержання фундаментальних знань про природу явищ і властивостей матеріалів у наношкالی, а також для створення й використання структур, приладів і систем, які володіють новими якостями завдяки своїм малим розмірам. Нанотехнологічні дослідження й розробки включають маніпуляції, що контролюються, нанорозмірними структурами та їх інтеграцію в більш крупні компоненти, системи і архітектури*» [3–4]. За допомогою нанотехнологій, а саме молекулярного виробництва, за прогнозами спеціалістів, стане можливим створення матеріальних об'єктів із надзвичайно низькою собівартістю.

У загальному вигляді можна запропонувати такі визначення:

- *нанотехнології* — це наука й техніка створення, виготовлення, характеристикації й реалізації матеріалів і функціональних структур і устроїв на атомному, молекулярному й нанометричному рівнях [5];

- *біотехнології* — це сукупність фундаментальних і прикладних досліджень, а також інженерних рішень, спрямованих на використання біологічних об'єктів, систем або процесів у промислових масштабах [6].

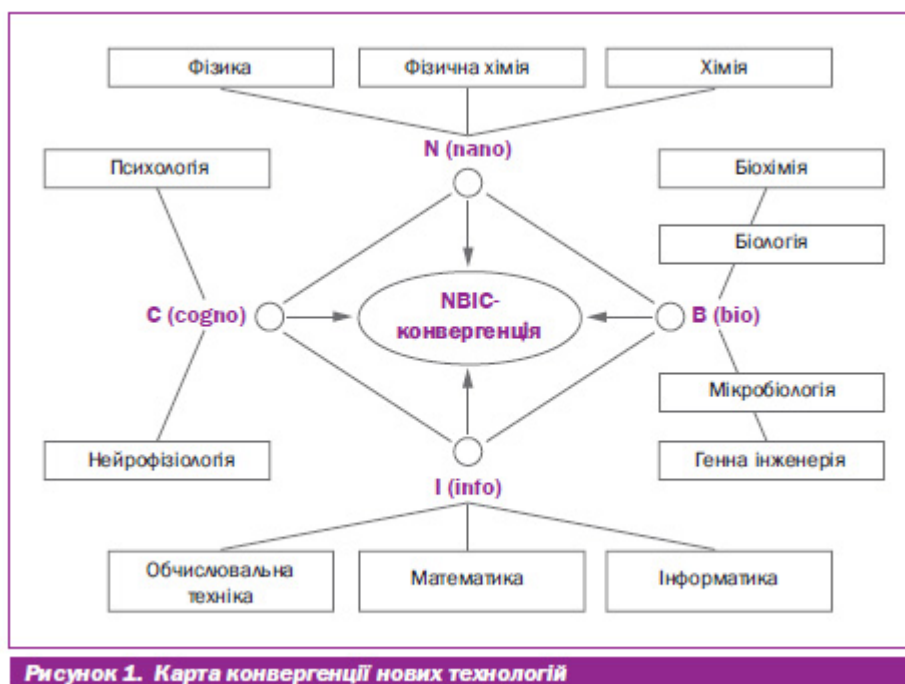
Синтезом нанотехнологій і біотехнологій є *нанобіотехнологія*. Використання принципів, за якими жива природа вибудовує надзвичайно ефективні наноструктури, може виявитися винятково корисним у створенні високоефективних каталізаторів, високоякісних полімерів, мембранних структур з керованою селективною проникністю, нових лікарських засобів і методів діагностики хвороб, наномашин і нанороботів, наноелектроніки й багато чого іншого. Із цих причин темпи розвитку біотехнологій, темпи інвестування в них, обсягів збуту в цій сфері зростають навіть швидше, ніж у середньому для нанотехнологій.

Термін «*NBISконвергенція*» було введено Майклом Роко і Уільямом Бейнбриджем у звіті за 2002 р., підготовленому в рамках Всесвітнього центру оцінки технологій (WTEC) [7–8]. Звіт був присвячений особливостям NBISконвергенції, її значенню в загальному ході технологічного розвитку світової цивілізації, а також її еволюційному й культурологічному значенню. Сутність NBISконвергенції полягає у *злитті чотирьох революційних науковотехнологічних напрямків: N — нанотехнологій; B — біотехнологій; I — інформаційнокомунікаційних технологій; C — когнітивних наук* [8].

Конвергенція являє собою не тільки взаємний вплив, але і взаємне проникнення технологій, коли границі між окремими технологіями стираються, а найбільш цікаві й неочікувані результати з'являються саме в рамках міждисциплінарної роботи на стику наук. З розвитком конвергенції NBIS-технологій уперше в історії людства спостерігається паралельне прискорення розвитку декількох науковотехнічних напрямків, що безпосередньо впливають на суспільство. Відповідно, розвиток і конвергенція NBISтехнологій призведе до значного стрибка у можливостях виробничих сил [9, с. 72]. І саме в рамках *NBISконвергенції* вже сьогодні відбувається часткове злиття науковотехнологічних напрямів у єдину науковотехнологічну галузь знання [9, с. 4849]

Враховуючи дослідження, засновані на аналізі наукових публікацій, візуалізації результатів взаємного цитування і кластерного аналізу, була побудована схема мережі найновіших технологій [10]. Автори цього дослідження (Борнер та інші) взяли за основу матеріали кількох тисяч наукових журналів, згрупували близькі за тематикою журнали за допомогою кластерного аналізу, базуючись на частоті взаємного цитування. Таким чином, на одній схемі була показана вся цілісна картина сучасної науки. Крім того, у роботах російських авторів із проблем трансгуманізму вказана мережа була допрацьована в карту перетинання найновіших технологій [9, с. 49].

Враховуючи вказані дослідження, можна скласти спрощену карту *конвергенції нових технологій*, наведену на рис. 1.



Розташовані на периферії карти основні сфери найновіших технологій утворюють спільні галузі взаємних перетинань. На цих стиках використовуються інструменти і напрацювання однієї галузі для розвитку іншої. Іноді вчені виявляють схожість об'єктів, що вивчаються, які належать до різних галузей науки і технологій.

З появою всього кілька десятиліть тому інформаційних технологій, які спочатку розглядалися просто як ще одна нова технологія, сьогодні докорінно змінюються погляди на галузевий характер економіки. Саме інформаційні технології — це перші технології, що мають надгалузевий характер, без використання яких немає прогресу в жодній відомій галузі: це й телемедицина, і дистанційне навчання, і автоматичні системи управління верстатом, автомобілем, літаком, кораблем тощо. Тобто інформаційні технології не просто додаткова ланка до існуючих дисциплін, вони об'єднали їх і стали загальною методологічною базою [11].

З розвитком нанотехнологій, що виконують таку ж надгалузеву роль і на відміну від інформаційних технологій є матеріальними, утворюється принципово новий фундамент будьякої галузі промисловості у вигляді принципово нового атомномолекулярного способу конструювання нових матеріалів. Тобто нанотехнології — це принципова модернізація усіх існуючих дисциплін і технологій на атомарному рівні, це фундамент для розвитку всіх без винятку галузей економіки постіндустріального суспільства.

Таким чином, з появою цих перших надгалузевих технологій і наук поряд із традиційною лінією розвитку науки (аналізом) остаточно сформувалась нова — лінія синтезу, коли людство одержало можливість синтезувати штучні матеріали, яких не існує в природі і яким притаманні властивості, відмінні від тих, що мають існуючі в природі речовини. Наразі з появою якісно нової науково технологічної бази є можливість контролювати процеси, що відбуваються на атомномолекулярному рівні, змодельовувати і запрограмувати результат за допомогою суперкомп'ютера. Тобто інформаційні технології надають інструменти для розвитку інших, зокрема за рахунок моделювання різних процесів.

Крім того, сьогодні відбувається зближення органічного світу (живої природи) з неорганічним. Біотехнології надають інструментарій і теоретичну основу для нанотехнологій і когнітивної науки, а також для розвитку інформаційних (комп'ютерних) технологій. Наприклад, створені особливі послідовності ДНК, які примушують синтезовану молекулу ДНК згортатись у двовимірні і тривимірні структури будьякої конфігурації. Такі структури можуть бути використані як «риштовання» для будівництва наноструктур і в майбутньому для синтезу білків, що виконують задані маніпуляції речовиною на нанорівні. А це є одним із напрямів розвитку наномедицини (і нанобіології) — комплексу технологій, що дозволяють управляти біологічними процесами на молекулярному рівні. Прикладом взаємопроникнення неорганічного й біоорганічного світів є також поєднання в першу чергу твердотільної мікроелектроніки з «конструкціями», створеними живою природою, тобто створення біоробототехнічних систем [12].

У результаті — принципово змінюється підхід до організації дослідницької роботи — від вузькоспеціального до міждисциплінарного методу проведення наукових досліджень. Таким чином, основними рисами сучасного етапу розвитку наукової сфери є: перехід до нанорозміру і зміна парадигми розвитку від аналізу до синтезу; зближення і взаємопроникнення неорганічного і органічного світу живої природи; міждисциплінарний підхід замість вузької спеціалізації; повернення до єдиної цілісної картини світу. З урахуванням вказаних вище взаємозв'язків у наукових колах розвинених країн була створена наукова концепція злиття NBICгалузей науки і технологій у єдину науковотехнологічну *галузь знань* [11].

Концепція NBIC повинна призвести не тільки до створення абсолютно нових товарів, послуг, матеріалів і пристроїв, але й до створення якихось типів виробництв, що не мають ще назви, засобів медичного обслуговування, транспортних систем і навіть принципово нових методик наукового дослідження, заснованих на застосуванні одночасно усього комплексу засобів, які напрацьовані у фізиці, хімії, біології, математиці, інформатиці тощо [8]. Тобто за своїми наслідками NBIC-конвергенція є найважливішим еволюційновизначальним фактором: розвиток вказаних технологій вплине на усі сторони життя людини (і багато з них змінить радикально), а сама еволюція людини перейде під її власний розумний контроль [9].

Вироблення комплексного й послідовного підходу до такої складної проблеми, як конвергенція технологій, повинне базуватись перш за все на вирішенні глобальних проблем людства; підвищенні продуктивності праці; створенні принципово нових товарів і послуг [13]. У табл. 1 наведено порівняння проблем людства та можливостей і загроз, що спричиняють процеси конвергенції NBIC-технологій [14, с. 3237].

Таблиця 1. Проблеми людства та можливості і загрози, що спричинюють процеси конвергенції NBIC-технологій

№ п/п	Проблеми людства	Можливості, що можуть бути реалізовані в найближчі 20 років	Можливості, що можуть бути реалізовані у більш віддаленому майбутньому	Зміни і загрози від впровадження NBIC-технологій
1	Депопуляція і старіння населення	<ol style="list-style-type: none"> 1. Цілеспрямоване втручання в генетику людини (та інших видів) 2. Інженерія органів і тканин, створення протезів і штучних органів, що перевершують за своїми можливостями природні 3. Ефективна профілактика і лікування практично всіх захворювань 4. Практичне призупинення старіння 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Радикальне розширення фізичних та інтелектуальних можливостей людини 2. Ревіталізація (оживлення, вилікування і омолодження) людей, що зберігаються сьогодні у стані глибокого охолодження засобами сучасної кріоніки 	Більшість людей будуть мати змогу покращити себе за допомогою заміни частин тіла на штучні та прямого втручання в генетичний апарат та обмін речовин
2	Нестача продовольства, вичерпання запасів ряду видів сировини і палива, нова енергетика та енергозбереження	–	<ol style="list-style-type: none"> 1. Досягнення глобального матеріального достатку на основі розвинених NBIC-технологій 2. Освоєння людиною нових середовищ проживання (водного середовища, інших планет, відкритого космосу, віртуального Всесвіту) 	Перетворення природи на безпосередню виробничу силу. Ресурси, що доступні людині, стануть практично необмеженими
3	Екологічні проблеми	–	Ефективне управління кліматичними змінами і процесами у біосфері, глобальне відновлення природних екосистем	–
4	Уповільнення науково-технічного прогресу	<ol style="list-style-type: none"> 1. Розширення інтелектуальних можливостей людини за рахунок використання вживлених або переносних сенсорних пристроїв, комп'ютерів, додаткової пам'яті, пристроїв зв'язку 2. Поява систем штучного інтелекту, що перевершують людину за своїми можливостями 3. Подальший розвиток інтерфейсу «людина — комп'ютер» 4. Переміщення все більшої частини активності у віртуальні простори 5. Розмивання бар'єрів, що залишилися, між людьми — географічних, державних, мовних 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Поява систем штучного інтелекту, що перевершує людину за своїми можливостями 2. Перенесення особистості людини на новий фізичний носій (наприклад, на штучну нейронну мережу або в комп'ютер, що має відповідну архітектуру та обчислювальну потужність) 3. Тераформінг планет 4. Космічна мегаінженерія 5. Створення біологічного суспільства, що буде максимально комфортним і повністю виключить страждання 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Трансформується розум людини, в тому числі й етичні системи 2. Постлюдський розум і штучний інтелект вийдуть на рівень надрозуму, який якісно переважає рівень людини 3. Постає питання щодо границь людяності 4. Дії штучного інтелекту можуть далеко виходити за межі розуміння людини 5. Існує загроза виходу з-під контролю людини нанороботів, що самовідтворюються

Таблиця 2. Синергетичний ефект від конвергенції нано-і біотехнологій

№ п/п	Глобальна проблема людства	Вплив нанотехнологій на розвиток біотехнологій	Вплив біотехнологій на розвиток нанотехнологій
1	Депопуляція і старіння населення	<ol style="list-style-type: none"> 1. Електронна промисловість одержить змогу випускати транзистори основних типів до 10 нм, які можна буде інтегрувати в схеми з біологічними структурами [8] 2. Розробка нових методів діагностики і лікування багатьох хронічних і тяжких захворювань. До 2015 року будуть створені датчики, які дозволять надійно реєструвати появу в організмі зл�якісних утворень на найбільш ранніх стадіях, що значно підвищить ефективність лікування і помітно знизить смертність від ракових захворювань [8] 3. Значне поширення різних нанобіосистем, які стануть основним засобом не тільки для дослідження організму, але й для самого процесу лікування. При розробці нових матеріалів і приладів дослідники будуть приділяти основну вагу збільшенню термінів експлуатації та забезпеченню їх біосумісності з тканинами організму людини [8] 4. Один з найбільш значущих напрямів — можливість створення респіроцитів (штучних еритроцитів) та мікробіворів (штучних лейкоцитів) [20] 5. Можлива модифікація форми білкової молекули за допомогою механічного впливу (фіксація «наноскобою») [21] 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Біологічні системи надають ряд інструментів для будівництва наноструктур. Наприклад, створені особливі послідовності ДНК, які примушують синтезовану молекулу ДНК згортатись у двовимірні і тривимірні структури будь-якої конфігурації [18]. Подібні структури можуть бути використані, наприклад, як «риштовані» для будівництва наноструктур 2. Існує перспектива синтезу білків, які виконують задані функції з маніпуляції речовиною на нанорівні (що, у свою чергу, потребує вирішення складної проблеми з вивчення принципів зсідання білків) [19] 3. Створюються умови для позаутробного відтворення людини, коли ембріони можна буде вирощувати у штучних матках — інкубаторах [22] 4. Клонування відкриває перспективи для тиражування найбільш вдалих з генетичної точки зору індивідумів, хоча для клонування людини необхідна розробка більш тонкої технології, ніж існуючі 5. Генна інженерія разом з клонуванням надасть можливість створювати тварин і людей із наперед заданими властивостями, вести планову роботу з покращення видів, підтримуючи при цьому оптимальну чисельність нової популяції
2	Нестача продо-	1. Нанотехнології дадуть змогу вирішити проблеми	1. Перехід на вирощування генно-модифікованих

Розглянемо більш детально взаємовплив нанотехнологій, біотехнологій, інформаційних технологій і когнітивної науки.

Прикладом того, як проблема конвергенції, зокрема *нано* та *біотехнологій*, виникла практично з початку розгортання нанодосліджень, може служити розвиток мікроелектронної промисловості в США, яка вже кілька десятиліть була й залишається однією з головних рушійних сил економіки цієї держави [15]. Так, уже в 1988 р., коли було створено перший мікроскопічний двигун розміром близько 100 нм з використанням процесів виробництва МЕМС (мікроелектромеханічних систем), які засновані на методах виготовлення інтегральних схем у мікроелектроніці, стало зрозуміло, що відбувається «розмивання» границь між механікою й електронікою. Подальше зменшення розмірів пристроїв до нанометричних масштабів призвело до злиття нанотехнологій з біологічними процесами [16]. Зокрема, коли деталі пристроїв стали наближатись до розмірів деяких функціональних макромолекул (типу ДНК або нуклеїнових кислот) виникла можливість створення дивовижних гібридних механізмів: наприклад, нанодвигуна на основі об'єднання мітохондріальної АТФази і металевого нанострижня [17].

Тобто на мікрорівні різниця між живим і неживим не настільки очевидна, як на макрорівні (коли поєднання, наприклад, людини і механічного протеза призводить до появи істоти змішаної природи — кіборга). При розгляді живих (біологічних) структур на молекулярному рівні стає очевидною їх хімічна природа. Наприклад, АТФсинтаза (комплекс ферментів, який присутній практично у всіх живих клітинах) за принципом своєї побудови і функціям являє собою мініатюрний електромотор. Гібридні системи, які розробляються сьогодні, наприклад мікроробот зі джгутиком бактерії як двигуна, не відрізняються принципово від природних (вірусів) або штучних систем. Подібна схожість побудови і функцій природних біологічних і штучних нанооб'єктів призводить до явної конвергенції нанотехнологій і біотехнологій [9, с. 50]. У перспективі нанотехнології призведуть до появи нової галузі — наномедицини (та нанобіології) — комплексу технологій, що дозволяють управляти біологічними процесами на молекулярному рівні.

Взаємодія нано і біотехнологій є двохсторонньою. У табл. 2 подано результати конвергенції нано і біотехнологій для вирішення проблем людства.

У майбутньому тривалість життя людини буде зростати за рахунок нових медичних та інших методів. Наприклад, існуючі медичні методики, що використовують стовбурові клітини, дозволяють справляти не тільки омолоджуючу дію, а й у перспективі вирощувати з них цілком нові органи: починаючи від зубів і до серця, печінки, нирок. Вже сьогодні для медичних цілей вирощують січкові міхури, суглоби, судини, м'язи тощо [12, с. 126]. Крім того, існує цілий ряд перспективних напрямів розвитку сучасних медичних нанотехнологій, наведених, зокрема, в роботах відомих авторських колективів [28, с. 102103; 29, с. 230266; 30, с. 167218; 31].

Таблиця 3. Взаємовплив нано- та інформаційних технологій

№ п/п	Глобальна проблема людства	Вплив нанотехнологій на розвиток інформаційних технологій	Вплив інформаційних технологій на розвиток нанотехнологій
1	Депопуляція і старіння населення	<ol style="list-style-type: none"> 1. Розробка <i>мікро- і нанороботів</i>, що спроможні самостійно навчатись і приймати рішення 2. У процесі розвитку обчислювальних технологій кількість атомів, необхідна для комп'ютерної симуляції одного атома, істотно скорочується. Це дозволяє розробляти <i>ефективні атомарні моделі</i> об'єктів нанометрового діапазону 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Розробка моделей, які роблять реальним зв'язок мозку людини з комп'ютером через мікрочипи 2. Побудова атомарних моделей вірусів і деяких клітинних структур розміром в декілька мільйонів атомів 3. Моделювання процесів з'єднання білків [34]
2	Уповільнення науково-технічного прогресу	<ol style="list-style-type: none"> 1. Нові, більш швидкісні і надійні методи обробки, передавання і зберігання інформації як на основі квантових ефектів (спінтроніка, фотоніка, плазмоніка, квантові обчислення), так і на основі нових технологій (самозбирання, молекулоніка (молекулярна електроніка), активні й пасивні елементи (транзистори, катоди, міжз'єднання) наноелектроніки, пристрої для зберігання інформації, а також на основі нанопродуктів (оптоелектроніка, органічна оптоелектроніка, міжз'єднання) 2. Створення наноелектронних пристроїв з атомарним розміром елементів, а також <i>наномеханічних систем</i> — <i>gears and rods</i> (шестерні і вісі), які використовують механічні принципи, схожі з принципами роботи рахункових машин, але реалізовані на атомарному рівні [35]. 3. Розвиток <i>комп'ютерних систем, що проникають</i> (pervasive computing), — використання комп'ютерних пристроїв, які розподілені у просторі і у звичних об'єктах (меблі, одяга, дорожнє полотно), а не локалізованих у великих комп'ютерах 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Доведено принципову можливість <i>симуляції складних нанопристроїв</i> — з атомарною точністю, враховуючи теплові і квантові ефекти, симуляція молекулярних пристроїв розміром до 20 тис. атомів. Найбільш досконалою програмою для такого моделювання є <i>Nanoengineer</i>, створена компанією <i>Nanogex</i> за участю Е. Дрекслера [36] 2. Використання нанотехнологій як: сировини для виробництва різних пристроїв і компонентів; матеріалів для обробки напівпровідникових пластин; для створення інструментів і обладнання при виробництві електронних пристроїв і компонентів

Молекулярні технології є одним із двох головних очікуваних технологічних досягнень ХХІ століття. Поява розвинених нанотехнологій, у свою чергу, призведе до появи комп'ютерів, достатньо потужних для моделювання мозку людини [32–33]. Всі підходи до подальшого збільшення обчислювальної потужності комп'ютерів, безумовно, пов'язані з мініатюризацією і ущільненням. У табл. 3 на окремих прикладах показано синергетичний ефект від конвергенції нано та інформаційних технологій, а в табл. 4 — взаємовплив інформаційних та біотехнологій.

Таблиця 4. Взаємовплив інформаційних і біотехнологій

№ п/п	Глобальна проблема людства	Вплив інформаційних технологій на розвиток біотехнологій	Вплив біотехнологій на розвиток інформаційних технологій
1	Депопуляція і старіння населення. Уповільнення науково-технічного прогресу	<ol style="list-style-type: none"> 1. Розробка <i>теорії клітинних автоматів</i>. Вивчення паралелей між клітинними автоматами і ДНК [37] 2. Продемонстровано практичну можливість хімічних обчислень на <i>ДНК-комп'ютерах</i> [38], що мають високий паралелізм і можуть вирішувати задачі не менш ефективно, ніж традиційні електронні. Вони можуть бути використані як інтерфейси на стику між електронними й біологічними пристроями, а також стати перехідним етапом до наномеханічних і квантових комп'ютерів 3. Моделювання потребує значної точності, що можлива тільки при високих обчислювальних потужностях. Для цього необхідно створення і використання <i>суперкомп'ютерів або систем розподілених обчислень</i> (наприклад, <i>Folding@Home</i> у Стенфордському університеті, США), що поєднує 2 млн комп'ютерів і потребує відповідного програмного забезпечення 4. Моделювання складних організмів на молекулярному, клітинному і системному рівнях зробить можливим <i>розробку і тестування ліків на комп'ютерних моделях</i>, вивчення всієї сукупності процесів обміну речовин, створення штучних організмів з нуля, розробку високоефективних ліків від більшості хвороб і старіння 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Моделювання біологічних систем, розвиток міжdisciplinarnoi nauki — <i>обчислювальної біотехнології</i>. Поява нового типу біо/медичних експериментів <i>in silico</i> (у комп'ютерній симуляції) на додаток до давно відомих <i>in vivo</i> (у живому), <i>in vitro</i> (у склі). Створені моделі вірусів, моделі внутрішніх клітинних структур (рибосом тощо), що складаються з декількох мільйонів атомів [39]. Розпочато міжнародні проекти з моделювання бактерії кишкової палички, моделювання кори головного мозку людини, вивчення роботи білків. В майбутньому стане можливим повне моделювання живих організмів — від генетичного коду до побудови організму, його зростання і розвитку, аж до еволюції популяції 2. Вивчення <i>паралелей між розвитком живого організму і математичними пристроями</i> (наприклад, клітинними автоматами); встановлення загальних характеристик, які мають і живий організм, і кібернетичний пристрій

У недалекому майбутньому можна буде очікувати як збільшення тривалості життя, так і більш активну участь старшого покоління у функціонуванні суспільства, що також зменшить потребу у трудових ресурсах.

Таким чином, сьогодні розвиток нанотехнологій передбачає розвиток двох *самостійних напрямів* [11]:

1. Створення *нової технологічної культури*, заснованої на конструюванні макроматеріалів шляхом спрямованого маніпулювання атомами і молекулами на рівні нанорозмірів. Головне в цьому те, що створюються нові матеріали, необхідні практично для всіх галузей промисловості, тобто мова йде про *формування ринку принципово нової продукції* в рамках існуючого економічного укладу. Нові матеріали з якісно новими, покращеними характеристиками затребувані у всіх сферах — від медицини до будівництва, від інформатики до легкої промисловості тощо. Результатом цього стане *еволюційна зміна технологічного і, як наслідок, соціально-економічного укладу суспільства*.

2. Другий напрямок, характерний вже для постіндустріального суспільства, складається з двох етапів:

— **перший етап:** *поєднання можливостей сучасних технологій, у першу чергу твердотільної мікроелектроніки як найвищого технологічного досягнення сучасності, з досягненнями в галузі пізнання живої природи (нанобіотехнології)*. Мета цього етапу — створення *гібридних антропоморфних технічних систем біонічного типу* (тобто вивчення «устрою» і можливостей людини та їх копіювання у вигляді модельних технічних систем). Науковотехнічний прогрес — це бажання людства досягти в технологічних приладах тієї досконалості, яка закладена в кожній людині. Сьогодні унікальні технології мікроелектроніки (наприклад, молекулярно-променева епітаксія, яка використовується для одержання тонких структур порядку розмірів атомів, а також нові структури — структури з квантовими точками, створення і поведінка яких уже підпорядкована принципам самоорганізації) дозволяють, поєднуючи літографію і послідовні суміщення, виробляти інтегральні схеми найвищого порядку складності в будь-якій країні світу. Таким чином, результатом першого етапу стануть *платформи для створення нанобіосенсорів* — принципово нових гібридних систем біонічного типу, що будуть мати змогу відчувати;

— **другий етап:** *інтеграція створених на першому етапі нанобіосенсорних платформ*. Метою другого етапу стане створення *технологій атомномолекулярного конструювання і самоорганізації на основі атомів і біоорганічних молекул*. В основі цього етапу лежить зближення і взаємопроникнення неорганіки і біоорганічного світу живої природи. Завдяки досягненням фундаментальної науки, що використовує перш за все рентгенівську фізику, розсіяння синхротронного випромінювання і нейтронів, ядерномагнітний резонанс, суперкомп'ютери, стала очевидною структура біологічних об'єктів. Було визначено їх складну тривимірну просторову структуру, вивчено механізми функціонування цих біологічних молекул. Сьогодні людство підійшло до технологічних рішень, в основі яких лежать базові принципи живої природи. Тобто починається новий етап розвитку, коли *від технічного, модельного конструювання «устрою» людини на основі простих неорганічних матеріалів людство буде готове перейти до відтворення систем живої природи на основі нанобіотехнологій*. Так стає можливим створення *біоробототехнічних систем*.

Створення так званого «*сильного*» *штучного інтелекту* стане другим очікуваним головним технологічним досягненням XXI століття. У сучасному суспільстві, що постійно ускладнюється і глобалізується, виникає необхідність у все більш складних системах управління. Сучасні машини (літаки, космічні апарати, підводні човни) вміщують уже таку кількість датчиків, що з їх аналізом людина вже не справляється. Тому виникає необхідність створення більш досконалої комп'ютерної «*нервової системи*» і центрального «*мозку*», що управляє цими машинами. З огляду на емпіричний закон Мура складність електронних систем уже в першому десятилітті XXI століття порівнюється зі складністю мозку. Програмне забезпечення, що буде повністю імітувати мислення людини, найімовірніше з'явиться до 2020 року. Надалі настане повнофункціональне злиття людського і машинного інтелекту [12].

Так, наприклад, навесні 2007 р. на надпотужному комп'ютері BlueGene команда вчених з IBM Almaden Research Lab і Університету Невади змодельювала і запустила в життя комп'ютерну модель половини мозку миші, яка працювала всього в 10 разів повільніше, ніж реальний мозок. Подальша робота в цьому напрямку, за словами керівника проекту, потребує більшої потужності [40]. Крім того, сьогодні іде робота (проект Blue Brain) над створенням повних комп'ютерних моделей окремих неокортексних колонок, що є базовим будівельним матеріалом нової кори головного мозку — *неокортексу* [41].

Взаємодія першої за часом виникнення (комп'ютерної) і останньої (когнітивної) хвиль науково-технічної революції стане в перспективі найбільш важливою точкою науковотехнологічного

зростання. Таким чином, *штучний інтелект все більше розвивається у бік створення глобальних систем суперінтелекту*, які будуть мати ієрархічну структуру: на нижньому рівні це може бути локальна мережа (що належить сім'ї або організації), наступний рівень може поєднувати вже різних людей за тими чи іншими інтересами, і над усім цим повинен бути ще більш високий рівень, що поєднує усі накопичені знання і коригує рішення [12, с. 135]. Суспільство вже сьогодні володіє безсмертям, оскільки тривалість його існування нічим не обмежена або принаймні набагато вища, ніж тривалість життя окремого індивіда. Ряд учених вважає, що в майбутньому суспільство все більше буде ставати єдиним організмом *mega sapiens* [42].

Висновки

1. Враховуючи наведені вище взаємозв'язки і міждисциплінарний характер сучасної науки в цілому можна передбачити в перспективі злиття NBICгалузей у *єдину науковотехнологічну галузь знання*. Синергетичний ефект від об'єднання цих чотирьох глобальних напрямів науки і технологій виявляється в майбутньому: *нано (N)* — це новий підхід до конструювання матеріалів «на замовлення» шляхом атомномолекулярного конструювання; *біо (B)* — дозволить ввести у конструювання неорганічних матеріалів біологічну частину і таким чином одержати гібридні матеріали; *інформаційні технології (I)* — нададуть можливість у такий гібридний матеріал або систему «підсадити» інтегральну схему і, як результат, одержати принципово нову інтелектуальну систему; *когнітивні технології (C)* — засновані на вивченні свідомості, пізнання, розумового процесу, поведінки живих істот і людини в першу чергу як з нейрофізіологічної і молекулярнобіологічної точок зору, так і за допомогою гуманітарних підходів. Конвергенція цих технологій з іншими (N, B та I) надасть можливість, ґрунтуючись на вивченні функцій мозку, механізмів свідомості, поведінки живих істот, розробляти алгоритми, які фактично і будуть «одушевляти» створювані ними системи за допомогою надання їм подоби розумових функцій.

2. Основними *задачами*, пов'язаними з реалізацією концепції NBICконвергенції, стануть: розвиток теорії архітектури і методів синтезу тривимірних наноструктур, а також матеріалів, пристроїв і систем на цій основі; спрямоване збирання атомарних і молекулярних структур; створення темплатів, матриць і шаблонів для синтезу гетерогенних наноструктур; багатовимірний і багатомасштабний дизайн матеріалів і процесів; нові методи створення інтегральних пристроїв; створення стандартних проміжних наномасштабних «будівельних блоків»; вирішення проблем фізичної і хімічної стабільності, наноструктур, що створюються, а також забезпечення надійності їх роботи тощо.

3. Розвиток науки і техніки сьогодні надає можливість повернутися до створення *єдиної науково-технічної картини світу*. На основі злиття різних наукових дисциплін та їх синергізму може відбутись бурхливий розвиток нових технологій, що спроможний призвести до революційних перетворень у промисловості, економіці, соціальному устрої тощо. Важливість нових технологій і пов'язана з ними зміна парадигм науки потребують особливої уваги до соціальних і етичних проблем, що неминуче виникають при їх плануванні, впровадженні і реалізації.

4. Саме конвергенція NBICгалузей дозволить ефективно, на якісно новому рівні *вирішити глобальні проблеми людства*, складність і тяжкість наслідків яких постійно зростає. Природа буде перетворена в безпосередню виробничу силу, а ресурси, доступні людині, стануть практично необмеженими.

5. Завдяки NBICконвергенції з'являється можливість *якісного зростання можливостей людини* за рахунок її технологічної перебудови. У віддаленому майбутньому мова може йти про початок нового етапу еволюції людини. Більша частина людства прийме зміни і покращить себе за допомогою NBIC-технологій, можливо, із заміною частин тіла на штучні і прямим втручанням у генетичний апарат і обмін речовин.

6. Відбудеться *трансформація розуму людини*, враховуючи етичні системи. Вдосконалений людський розум і штучний інтелект розвинуться до рівня створення надрозуму, що якісно переважає рівень людини. Постає питання про границі людськості, тобто про визначення переходу до постлюдини.