

---

# DIGITAL MEDICINE

## ЦИФРОВА МЕДИЦИНА

<https://doi.org/10.15407/intechsys.2025.03.076>  
УДК 004.318

**М.Г. ПЕТРЕНКО**, д-р техн. наук, старш. наук. співроб., провідн. наук. співроб,  
Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України,  
просп. Акад. Глушкова, 40, Київ, 03187, Україна  
<https://orcid.org/0000-0001-6440-0706>  
petrng@ukr.net

**К.С. МАЛАХОВ**, наук. співроб.,  
Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України,  
просп. Акад. Глушкова, 40, Київ 03187, Україна  
<https://orcid.org/0000-0003-3223-9844>  
malakhovks@outlook.com

## МЕТОДОЛОГІЯ І ПРАКТИКА КОНВЕРГЕНЦІЇ МІЖДИСЦИПЛІНАРНИХ ЗНАНЬ У СФЕРІ ЦИФРОВОЇ ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я<sup>1</sup>

---

*У статті обґрунтовано методологічні засади трансдисциплінарного підходу та показано його прикладне значення для цифрової охорони здоров'я. Інтеграція знань медицини, інформатики, інженерії та соціально-поведінкових наук розглядається як передумова*

---

<sup>1</sup> Дослідження виконано за договором з ТНМУ ім. І.Я. Горбачевського МОЗ України – НДР «Розроблення дослідного зразка експертної системи підтримки прийняття рішень на основі ШІ» (<https://prozorro.gov.ua/uk/contract/UA-2025-05-13-012069-a-c1>), у межах виконання НТР «Розроблення персоналізованої теледіагностичної платформи з ШІ для лікаря та пацієнта (ТД+AI)» згідно з договором між МОН України та ТНМУ імені І.Я. Горбачевського МОЗ України від 12.02.2025 №ДЗ/164-2025. Реєстраційна картка НДДКР 0125U001036 від 13.02.2025.

Дослідження також проведено в межах НДР «Розробити теоретичні засади і функціональну модель комп'ютера для обробки складних інформаційних структур» (державний реєстраційний номер: 0124U002317, <https://nrat.ukrintei.ua/searchdoc/0124U002317/>) та НДР «Розробити засоби підтримки технологій віртуалізації та їх використання в комп'ютерній інженерії та інших застосуваннях» (державний реєстраційний номер: 0124U001826, <https://nrat.ukrintei.ua/searchdoc/0124U001826/>)

Усі проєкти реалізовано на базі Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України (Київ, Україна).

---

Цитування: Петренко М.Г., Малахов К.С. Методологія і практика конвергенції міждисциплінарних знань у сфері цифрової охорони здоров'я. *Information Technologies and Systems*, Київ, 2025, Том 3 (3), 76–96. <https://doi.org/10.15407/intechsys.2025.03.076>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2025. Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

створення ефективних дистанційних реабілітаційних сервісів. Окреслено концептуальні межі дисциплінарного, між-, мульти- та трансдисциплінарного підходів і показано, як їхня конвергенція генерує інноваційні рішення. На підтвердження теоретичних висновків виконано умовно-емпіричне дослідження у гібридному хмарному середовищі *Hybrid cloud environment for telerehabilitation*. Отримані результати свідчать про потенційну клінічну й економічну ефективність трансдисциплінарно-орієнтованих цифрових платформ, особливо для пацієнтів із обмеженим доступом до очної реабілітаційної медицини

**Ключові слова:** наукова картина світу, трансдисциплінарність, міждисциплінарність, конвергентні технології, цифрова охорона здоров'я, умовно-емпіричне дослідження.

## Вступ

У сучасній науковій картині світу (НКС), що ґрунтується на принципах загальної еволюції, самоорганізації, коеволюції та нелінійності, передбачається, що суб'єкт — маєтєся на увазі суспільство — входить у систему, яку він прагне зрозуміти як активний компонент цієї процес-системи. Ця перспектива підкреслює динамічну та колективну роль суспільства у формуванні систем, які воно вивчає [1–3].

Відомою філософською концепцією, що виникла в цьому контексті, є трансгуманізм, який досліджує можливості та наслідки науково-технічного прогресу, зважаючи на потенційні небезпеки та переваги його застосування. На протипагу цьому, ідеї постгуманізму пропонують центральну тезу, яка підкреслює взаємозалежну еволюцію людини, суспільства і природи як трьох взаємопов'язаних систем [4].

Технонаука суттєво змінила умови життя людини. Ці зміни зумовили необхідність розширення наукового світогляду, вимагаючи більш глибокого та інтенсивного проникнення в сутність законів, що керують природою і суспільством, — за межі того, що можна було досягти в рамках дисциплінарних або навіть міждисциплінарних підходів. Жан Піаже, як відомо, вважав, що «після етапу міждисциплінарних досліджень слід очікувати вищого етапу — трансдисциплінарних досліджень, які не обмежуватимуться міждисциплінарними зв'язками, а помістять ці зв'язки в глобальну систему, без жорстких кордонів між дисциплінами. Трансдисциплінарність слід розглядати як нову галузь знань, відмінну від мультидисциплінарності та міждисциплінарності» [5]. Історичний розвиток трансдисциплінарних досліджень досліджувався в різних роботах [6–9].

Метою дослідження є вивчення теоретичних і практичних аспектів трансдисциплінарних досліджень з акцентом на їх застосуванні у *Digital Health* [1]. Їх дослідження має на меті зробити посильний внесок у постійний розвиток цифрової охорони здоров'я (ЦОЗ) як інтегрованої та цілісної галузі дослідження.

## Постановка проблеми

У класифікації наукових підходів корисним критерієм є ступінь повноти знань про навколишній світ. Виходячи з цього критерію, наукові підходи можна розділити на чотири основні типи: дисциплінарний (Д), міждисциплінарний (МД), мультидисциплінарний (МтД) та трансдисциплінарний (ТД).

В статті зазначені терміни розуміють у зв'язку з «розподілом» концептів і наукових дисциплін на різних онтологічних рівнях ієрархії, що передбачає різні моделі взаємодії. Такий розподіл важливий при розгляді методології ТД взаємодії, системної інтеграції знань з предметних дисциплін, формування «кластерів конвергенції» [7, 10] при реалізації трансдисциплінарних проєктів, включно з їх інформаційно-технологічною підтримкою.

До категоріального рівня належать такі ключові поняття, як Ноосфера, Об'єкт, Процес, Система, Інформація, Природа, Суспільство, Людина, Сфера знань, Наука, Наукова діяльність, Наукова картина світу, Техніка, Технологія. Такі поняття, як Філософія, Фізика, Математика, Біологія, Хімія, Медицина, Гуманітарні та Соціальні науки, Інформатика, Нанотехнології відповідають рівню доменів наукових дисциплін. Багато субдисциплін і спеціалізацій у цих галузях підпадають під рівень наукових дисциплін.

Схему категоріального та доменного рівнів знань у НКС та взаємозв'язки між відповідними концептами наведено на рис. 1. Повний опис усіх елементів виходить за рамки цього дослідження і розглянуто в [9].

*Дисциплінарний підхід* дає змогу науці розвиватися в межах конкретних предметних галузей, розділяючи світ на окремі сфери. Однак, коли проблема виходить за межі однієї дисципліни, її часто вважають такою, що перебуває на перетині наукових дисциплін. У міру розвитку Д підходу виникає природна невизначеність: з одного боку, він сприяє накопиченню дисциплінарного знання, а з іншого — досягає природної межі в повному розумінні навколишнього світу. Ця ситуація свідчить про те, що коли стає неможливим вирішити проблеми в межах дисциплінарного напрямку, сфера застосування дисциплінарної методології може бути розширена [6]. Таке розширення призвело до появи МД та МтД наукових підходів, які формують наступні рівні в класифікації наукових підходів. Розвиток цих підходів трансформував метафору «стику дисциплін» у сформовані міждисциплінарні та мультидисциплінарні напрямки, кожен з яких має свої методи вирішення дослідницьких проблем [6].

*Міждисциплінарність* передбачає інтеграцію кількох наукових дисциплін, причому одна з них часто відіграє провідну роль. Результати міждисциплінарних досліджень зазвичай інтерпретуються в рамках провідної дисципліни. Ключовою особливістю міждисциплінарного підходу є сприяння прямому перенесенню методів дослі-

дження з однієї дисципліни в іншу на основі виявлення схожості між предметними областями. МД підхід в першу чергу спрямований на вирішення конкретних дисциплінарних проблем, особливо коли виникають концептуальні та методологічні труднощі в межах певної дисципліни.

*Синергетична парадигма*, як відгалуження МД підходу в ієрархії знань, посідає особливе місце. З одного боку, вона апелює до цілісного уявлення, системно визначаючи ефекти взаємодії між об'єктами, процесами та суб'єктами. З іншого боку, вона фокусується на нелінійностях, нестабільності та появи атракторів, які в кінцевому підсумку змінюють багаторівневу організацію та поведінку системи. Ця парадигма виражається через формальні моделі самоорганізації і відіграє ключову роль у відтворенні НКС, особливо під час переходу до ТД підходу та реалізації парадигми глобального еволюціонізму. НКС можна подати як ТД онтологію [7], що включає в себе не тільки онтології окремих дисциплін, але й їхні методи. ТД підхід дає змогу створити єдину методологію аналізу та синтезу, інтегруючи її в загальну НКС. Виклики та потенціал синергетики обговорюються в [7, 8].

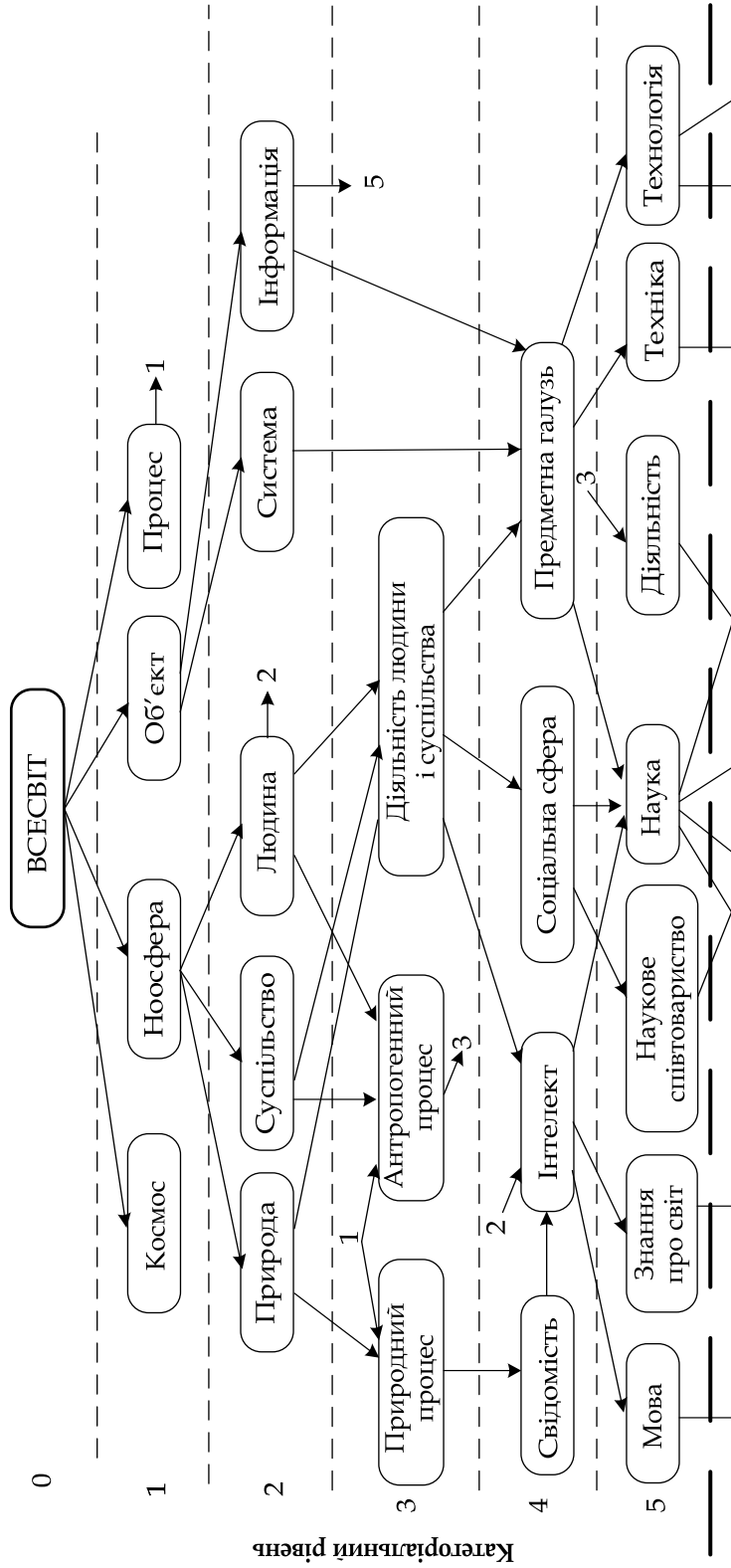
В рамках *мультидисциплінарного підходу* дослідники розробляють узагальнену картину предмета дослідження, причому всі дисциплінарні методи і моделі є однаково вагомими. Накопичення результатів міждисциплінарних досліджень у схожих галузях дисциплінарного знання призводить до появи нових міждисциплінарних дисциплін, таких як фізико-хімічна біологія, екологія тощо. Мультидисциплінарний підхід знайшов практичне застосування, зокрема в роботі експертних груп.

*Мультидисциплінарність* не передбачає перенесення методів дослідження між дисциплінами, натомість кожна дисципліна зберігає свій предметний фокус.

*ТД системний підхід* використовує знання, отримані та накопичені дисциплінарними, міждисциплінарними та мультидисциплінарними підходами. ТД має на меті забезпечити координацію та інтеграцію дисциплінарних знань на основі єдиного аксіоматичного підходу (загальних ТД систем). Таке бачення трансдисциплінарності було вперше концептуалізовано Ж. Піаже та Е. Янчем [5, 6].

*Трансдисциплінарність* є дослідницькою стратегією, яка виходить за межі дисциплінарних кордонів, сприяючи формуванню цілісного погляду (пріоритет цілого над його частинами). У вузькому сенсі ТД передбачає інтеграцію різних форм і методів дослідження, включно зі спеціалізованими методами наукового пошуку, для вирішення складних наукових проблем. У ширшому розумінні ТД означає єдність знань, що виходять за межі конкретних дисциплін.

Трансформація структури науки, пов'язана з переходом від дисциплінарних до ТД досліджень, характеризується кількома ознаками постнеокласичного етапу: зміною характеру наукової діяльності внаслідок прогресу в отриманні та зберіганні знань (наприклад,





комп'ютеризація науки, зрощення науки з промисловим виробництвом), зростанням значення економічних і соціально-політичних чинників і цілей, а також зміною самого об'єкта дослідження – відкритих систем, що саморозвиваються (наприклад, об'єкти біотехнологій, екологічні системи, біосфера тощо).

ТД дослідження, захоплюючи прикордонні зони (демаркаційні лінії) наукових дисциплін, інтегрують їх сутнісні основи, формуючи «кластери конвергенції» [7, 8]. Ці кластери сприяють потужній синергетичній взаємодії завдяки взаємопроникненню парадигм і конкретних поточних результатів кожної залученої дисципліни. Ця взаємодія відображає цілісність реального світу, слугуючи одночасно і стимулом, і гарантією успіху для ТД досліджень та пов'язаних з ними практичних проєктів, нетривіальність і значущість яких підкреслюється їхніми результатами.

## Основи методології

Єдність і системна складність світу як об'єкта наукового дослідження свідчать про те, що поряд з процесом диференціації не менш важливо розглядати інтеграцію наукових дисциплін і відповідних технологій. Цей інтегративний процес узгоджується з фундаментальною парадигмою еволюційної теорії, запропонованої акад. В.І. Вернадським [11]. Хоча інтеграція наукових дисциплін почалася дещо спонтанно та інтуїтивно, зараз вона стала більш свідомим і цілеспрямованим процесом. Цей процес дедалі більше керується еволюційною теорією, спрямованою на створення єдиного масиву загальних знань (ЗЗ) [12]. Суть цього прагнення полягає в побудові загального знання на основі трансдисциплінарної концепції наукового розвитку.

Початковий етап цього інтеграційного процесу можна охарактеризувати як етап кластеризації. Навіть поверхневий аналіз феномену кластеризації показує, що в його основі лежить глибока взаємодія методів, інструментів і можливостей компонентів кластера. Синтез цих компонентів породжує синергетичні ефекти за рахунок інтеграції їх функційних властивостей, тим самим відкриваючи широкі перспективи для створення раніше невідомих наукових теорій, нової техніки і технологій. Процес інтеграції, що триває, ставить численні питання, відповіді на які допоможуть окреслити нові, перспективні шляхи еволюції знань і науки в цілому, відповідно до ноосферної теорії В.І. Вернадського [10, 11].

Одним із завдань на цьому еволюційному шляху є аналіз структури знань на концептуальному рівні. ЗЗ, як і кожен з їх дисциплін, можна подати як всеосяжний набір понять-термінів, що становлять онтологічну основу для опису знань, як формальних, так і неформальних. Кожен термін у цій структурі має своє загальноприйняте визначення, яке пояснюється за допомогою термінів або понять нижчого рівня. Розроблено технологічний багаторівневий онтологічний

опис як для ЗЗ, так і для їх окремих дисциплін, розділів, теорій тощо, що дає змогу формально подати знання за допомоги уніфікованого інструментарію онтологічної інженерії [13–15]. Цей інструментарій відкриває широкі перспективи для розвитку когнітивних технологій та їх продуктивного застосування. Нижче наведено узагальнений формальний опис сукупності предметних знань

$$O^{33} = \sum_{i=1}^n O_i^{D3},$$

де  $D3$  – дисциплінарні знання  $i$ -ої предметної галузі, які входять в загальну ТД онтологію,  $i = \overline{1, N}$ ,  $N$  – множина предметних галузей.

Наразі спостерігається тенденція до інтенсифікації наукових досліджень як на перетині різних предметних дисциплін (МД дослідження), так і в межах конвергентних кластерів (ТД-дослідження). Для підтримки цих досліджень визначальними є кілька ключових факторів, серед яких побудова інформаційних систем, орієнтованих на знання, вдосконалення процесів організації досліджень, вдосконалення методів та інструментів онтологічного аналізу об'єктів природної мови з використанням генеративних мовних моделей [16, 17] для вилучення знань, а також прикладне використання онтологій, мета-онтологій та систем інтеграції знань [18] у трансдисциплінарних кластерах конвергенції.

Стрімкий розвиток конвергентних технологій має потенціал для значного покращення як людської діяльності, так і національних економік. Яскравими прикладами таких досягнень є підвищення ефективності роботи та навчання, розширення сенсорних та когнітивних можливостей, принципово нові виробничі процеси, революційні зміни в охороні здоров'я, підвищення індивідуальної та групової ефективності, передові методи комунікації (включно з взаємодією «мозок-мозок»), вдосконалення людино-машинних інтерфейсів [19] (наприклад, нейроморфної інженерії для промислового та особистого використання), розширення можливостей людини в оборонних цілях, досягнення сталого розвитку за допомоги інструментів NBIC кластера ( $N$  – Nano,  $B$  – Bio,  $I$  – Info,  $C$  – Cogno) [20]. Крім того, ці технології є перспективними для подолання фізичного та когнітивного занепаду, пов'язаного зі старінням.

Яскравим прикладом технонауки є описаний NBIC кластер конвергенції (Roco, 2016), де інформатика виступає як системоутворюючою, так і комп'ютерно-технологічною складовою. Основними проривними напрямками в рамках цих кластерів є розмивання меж між живими і неживими системами, досягнення в наноробототехніці з численними застосуваннями, а також розвиток глобальних суперкомп'ютерних агломерацій з розвиненими можливостями штучного інтелекту (ШІ). До цього можна додати єдину розподілену систему ТД знань, що є глобальною комунікативною версією загальної НКС і

є наступним етапом в еволюції наявного інтернету та семантичного павутиння.

Можлива схема прогнозування та цілеспрямованого формування перспективних кластерів конвергенції, а також їх синергетичної взаємодії та результуючої сукупної ефективності для людства потребує подальшого вивчення в окремому дослідженні.

## **Застосування трансдисциплінарного підходу до телереабілітації**

Принципи ТД досліджень, особливо ті, що стосуються інтеграції та конвергенції знань з різних дисциплін, мають важливе значення для сфери цифрової охорони здоров'я. ЦОЗ за своєю суттю працює на перетині декількох областей, включно з медициною, фізичною терапією, цифровим здоров'ям, інформатикою та інженерією. На рис. 2 показано схему зв'язків між когнітивними технологіями, різними галузями науки і ЦОЗ та телереабілітацією.

Застосування трансдисциплінарного підходу у цьому контексті уможливорює розробку цілісних реабілітаційних програм, які є більш персоналізованими, адаптивними та чутливими до унікальних потреб пацієнтів. Зокрема, можна зазначити ось що.

**1. Кластеризація дисциплін і технологій.** У ЦОЗ етап кластеризації передбачає інтеграцію медичних знань, методів фізичної терапії та цифрових технологій, таких як телекомунікаційні платформи, переносні датчики і штучний інтелект. Такий синтез створює нові можливості для надання дистанційних реабілітаційних послуг, які є одночасно ефективними та результативними. Наприклад, інтеграція аналітики, керуваної ШІ з даними про пацієнта в реальному часі [21] може забезпечити індивідуальні реабілітаційні вправи та динамічно коригувати протоколи терапії залежно від прогресу пацієнта.

**2. Синергетичні ефекти та інновації.** Синергетичний ефект від інтеграції різноманітних дисциплін може призвести до інновацій у реабілітаційних практиках. Наприклад, поєднання знань з нейробиології з передовою робототехнікою і машинним навчанням може призвести до розроблення інтелектуальних протезів [22, 23], які не тільки підвищують мобільність, але й адаптуються до неврологічних сигналів користувача, тим самим покращуючи результати в умовах ЦОЗ.

**3. Онтологічна інженерія в цифровій охороні здоров'я.** Застосування технологічних багаторівневих онтологічних описів у ЦОЗ [24–26], дає змогу формально подавати дані про пацієнтів [27], протоколи лікування та результати реабілітації. Ці структуровані знання можуть бути використані для створення комплексних, інтероперабельних інформаційних систем [12], які полегшують комунікацію та обмін даними між різними постачальниками медичних послуг, підвищуючи безперервність надання допомоги пацієнтам, які проходять реабілітацію.

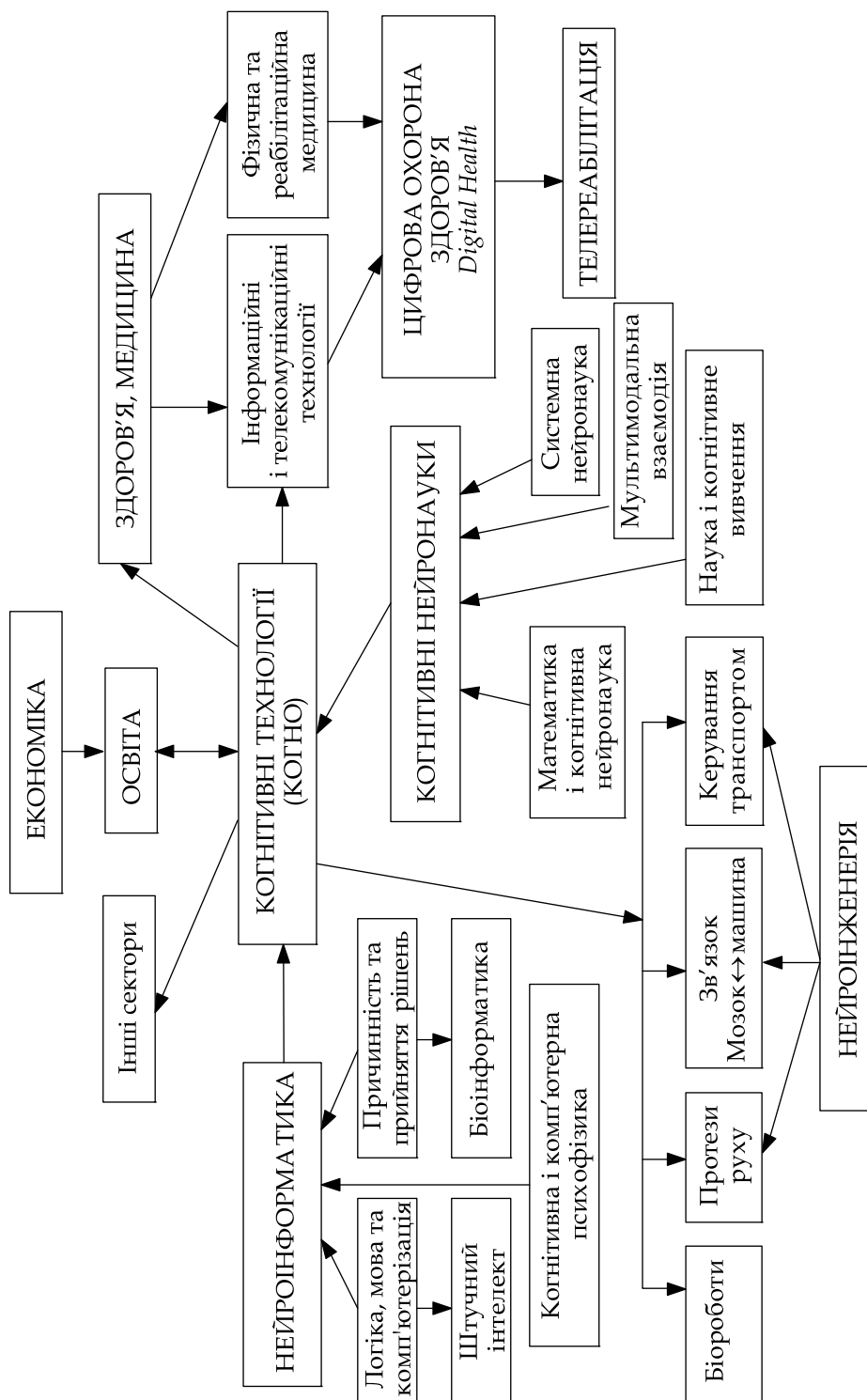


Рис. 2. Зв'язок між когнітивними технологіями та різними галузями науки і техніки

**4. Кластери конвергенції на практиці.** NBIC-кластер конвергенції в ЦОЗ сприяє розвитку інтегрованих систем, в яких нанотехнології, біотехнології, інформаційні технології та когнітивні науки об'єднуються для створення передових засобів реабілітації. Наприклад, інтерфейси «мозок-комп'ютер» [19] можуть бути використані в ЦОЗ для допомоги пацієнтам з важкими порушеннями рухливості, даючи змогу їм керувати протезами або спілкуватися з допомогою думки, що значно покращує якість їхнього життя.

**5. Виклики та майбутні напрями.** Хоча застосування трансдисциплінарного підходу до ЦОЗ є багатообіцяльним, воно також пов'язане з певними проблемами, які потребують вирішення. Серед них можливо відзначити необхідність стандартизованих протоколів для інтеграції даних [28], забезпечення конфіденційності та безпеки даних пацієнтів (з використанням сучасних технологій, таких як багаторівневе розпізнавання облич [29, 30], а також розроблення масштабованих моделей, які можуть бути застосовані в різних медичних установах. Майбутні дослідження повинні бути зосереджені на вирішенні цих проблем, продовжуючи досліджувати нові кордони інтеграції технологій і дисциплін в рамках ЦОЗ.

ТД дослідження являють якісно новий етап в інтеграції науки і суспільства. Щоб повністю реалізувати свій потенціал, особливо в таких галузях як ЦОЗ, науковій спільноті все ще необхідно розробити і розвинути кілька ключових компонентів:

1. Загальну НКС, що охоплює предметні дисципліни та відповідну глобальну мережу ТД знань.

2. Метатеорію та метамову [31, 32] опису ТД знань.

3. Системологію ТД взаємодії, яка містить образний понятійний апарат і моделі, здатні охопити всі фактори, що формують і впливають на складні проблеми, а також виявити і врахувати механізми, з допомогою яких ці впливи відбуваються.

4. Метод (або сукупність методів) системного дослідження, що забезпечує доступ до всієї дисциплінарної інформації та її аналіз, зрозумілий і доступний фахівцям з будь-якої наукової дисципліни.

5. Перспективні та самодостатні кластери конвергенції, які складуть ядро шостого технологічного укладу.

6. Експериментальні методи, що дозволяють досліджувати багатофакторні впливи на об'єкти пізнання та оцінювати їх результати. Сюди відносяться різні інструменти інформаційних технологій, покликані підвищити ефективність і прискорити отримання результатів.

7. Підходи до постановки та розв'язання складних багатофакторних задач у науці, техніці та технологіях.

Ці розробки стануть ключовими в просуванні інтеграції знань і досягненні цілей трансдисциплінарних досліджень в майбутньому, зокрема в сфері ЦОЗ, що розвивається і має великий вплив.

## Інтеграція та її ключові дисципліни для цифрової охорони здоров'я

ЦОЗ – це галузь, яка за своєю суттю потребує інтеграції кількох дисциплін для надання ефективної, орієнтованої на пацієнта допомоги дистанційно. Оскільки охорона здоров'я продовжує розвиватися разом із технологічним прогресом, інтеграція дисциплін у процес ЦОЗ (і телереабілітації зокрема) стає все більш важливою. Нижче коротко розглядаються основні дисципліни, пов'язані з ЦОЗ, і те, як їх перетин та інтеграція сприяють розробці та впровадженню міждисциплінарних підходів у цій галузі.

*Медицина та фізична реабілітація.* ЦОЗ глибоко інкорпорована в принципах медицини та фізичної реабілітації. Лікарі та фізіотерапевти несуть відповідальність за діагностику, розроблення та впровадження протоколів реабілітації, адаптованих до індивідуальних потреб пацієнтів. Ці медичні працівники повинні гарантувати, що терапевтичне втручання, яке здійснюється дистанційно, є таким же ефективним, як і особисте лікування, враховуючи нюанси стану кожного пацієнта.

*ЦОЗ та медична інформатика.* Поява ЦОЗ зробила революцію в медицині, уможлививши дистанційне надання медичної допомоги за допомогою телекомунікаційних технологій [33–35]. Інформатика охорони здоров'я відіграє важливу роль в управлінні даними пацієнтів, сприянні телеконсультаціям і забезпеченні повної інтеграції електронних медичних записів (ЕМЗ) із протоколами реабілітації. Ці технології підтримують безперервний моніторинг, залучення пацієнтів та ефективно керування великими обсягами даних, що є критично важливим для успіху програм ЦОЗ.

*Комп'ютерні науки та інженерія.* Розроблення та застосування цифрових платформ переносних мобільних додатків для здоров'я та технологій, обумовлені досягненнями в комп'ютерних науках та техніці. Ці дисципліни сприяють створенню зручних інтерфейсів, безпечних протоколів передачі даних та інтеграції алгоритмів машинного навчання в системі ЦОЗ. Інженери та комп'ютерні фахівці тісно співпрацюють із постачальниками медичних послуг, щоб переконатися, що ці технології не тільки функційні, але й підвищують якість медичної допомоги, яка надається віддалено.

*Когнітивні та поведінкові науки.* Когнітивні та поведінкові науки є невід'ємною частиною розуміння поведінки пацієнтів, мотивації та дотримання протоколів реабілітації. Ці дисципліни інформують про розроблення втручань, які є психологічно підтримувальними та заохочують постійне залучення пацієнтів. Застосовуючи принципи когнітивно-поведінкової терапії та інші психологічні рамки, програми ЦОЗ можна адаптувати до психічних та емоційних аспектів відновлення, які часто є критичними для успішних результатів реабілітації.

Гуманітарні та соціальні науки. Гуманітарні та соціальні науки пропонують важливу інформацію про соціальні детермінанти здоров'я, культурні міркування та етичні наслідки ЦОЗ [36]. Ці дисципліни гарантують, що програми ЦОЗ є інклюзивними, культурними та етичними. Вони також розглядають ширший суспільний вплив дистанційної реабілітації, включно з доступом до догляду, справедливості і цифровим розривом, який може суттєво вплинути на ефективність системи ЦОЗ та її послуг.

## Роль міждисциплінарної та трансдисциплінарної інтеграції

Інтеграція наведених дисциплін у ЦОЗ відбувається як на рівнях МД, так і на рівнях ТД.

**Рівень МД інтеграції.** В цифровій охороні здоров'я МД інтеграція передбачає співпрацю різних дисциплін, де кожна дисципліна зберігає свої специфічні методології та перспективи. Наприклад, програма реабілітації може охоплювати фізіотерапевта, який працює з інженером над розробленням переносного пристрою, що відстежує рухи пацієнта (інтернет медичних речей). Дані, зібрані пристроєм, потім аналізують фахівці з медичної інформатики для коригування протоколу реабілітації, а вчені-когнітологи можуть оцінити психологічну реакцію пацієнта на лікування. Кожна дисципліна вносить свій досвід, але фокус залишається на вирішенні певного аспекту процесу реабілітації.

**Рівень ТД інтеграції.** ТД інтеграція йде ще далі, виходячи за рамки традиційних дисциплін, щоб створити єдину структуру для ЦОЗ. У такому підході відмінності між дисциплінами стають менш вираженими, суттєво проявляються спільні зусилля для інтеграції знань, теорій і методів, а також для цілісного вирішення складних проблем реабілітації. Наприклад, розроблення комплексної програми ЦОЗ, яка охоплює адаптивну терапію на основі штучного інтелекту, потребує повної інтеграції медичних знань, цифрових платформ охорони здоров'я, алгоритмів ШІ та розуміння поведінки пацієнтів. Цей цілісний підхід дає змогу створювати персоналізовані плани реабілітації, які постійно оптимізуються на основі даних у реальному часі та відгуків пацієнтів [19].

Інтеграція трансдисциплінарних знань у ЦОЗ, яка підтверджена симуляційним експериментом (детально описаним у наступному розділі), відкриває низку практичних переваг. По-перше, персоналізовані плани реабілітації, які формуються на основі медичних, когнітивних та технічних даних, адаптуються в реальному часі, що підвищує залученість та дотримання пацієнтів. По-друге, цифрові платформи долають географічні бар'єри, полегшуючи доступ пацієнтів із віддалених регіонів і зменшуючи потребу у фізичних візитах. По-третє, міждисциплінарна співпраця клініцистів, інженерів та фа-

хівців з даних забезпечує безперервне вдосконалення інструментів телереабілітації та сприяє спільному прийняттю рішень. Нарешті, автоматизований моніторинг і аналітика підвищують економічну ефективність, оптимізують використання ресурсів і підтримують доказову практику.

## Умовно-емпіричне дослідження оцінки ефективності ТД підходу при розробленні персоналізованих програм телереабілітації

У сфері ЦОЗ та біомедичної інформатики український термін «умовно-емпіричне дослідження» (УЕД) стосується робіт, у яких методи комп'ютерного моделювання або синтетичні дані поєднуються з емпіричними підходами. В англійській літературі [37–40] такі роботи описують за допомогою термінів: *in silico experiment / study, simulation-based evaluation, synthetic patient data evaluation, scenario-based evaluation* чи *model-driven evaluation*. Кожен із них має власний контекст і акцент [37, 38, 40]:

- *in silico trial* – повністю комп'ютерно змодельоване клінічне випробування; поширене у обчислювальній фармакології та оцінюванні медичних виробів.

- *Simulation study / simulated experiment* – контрольований експеримент із віртуальними пацієнтами (наприклад, сценарій катастрофи з акторами або манекенами) для тестування цифрових втручань.

- *Synthetic patient data* – використання віртуальних електронних медичних записів або цифрових двійників (англ. *Digital twins*) пацієнтів для розроблення та валідації алгоритмів без ризику порушення конфіденційності.

- *Scenario-based evaluation* – застосовують у дослідженнях продуктивності та навчальних симуляціях; система випробується за заздалегідь підготовленими клінічними сценаріями.

- *Model-driven evaluation* – базується на формальних обчислювальних моделях (зокрема *digital-twin models*) й прогнозує поведінку системи до її фактичного впровадження.

У кожному випадку дослідження є емпіричним лише умовно – воно спирається на комп'ютерні або сценарні проксі, а не на безпосереднє спостереження за реальними пацієнтами. Отже, *умовно-емпіричне дослідження* – це оцінювання клінічних інновацій з допомогою *simulation, synthetic data* або *model-based scenarios* у ситуаціях, коли традиційні випробування є надто складними чи затратними; у такому форматі вивчення спирається на комп'ютерні або сценарні проксі, а не на безпосереднє спостереження за реальними пацієнтами, що робить його оптимальним підходом для реалізації нашого експерименту.

Ми проводили УЕД з метою оцінювання ефективності ТД підходу під час розроблення персоналізованих програм телереабілітації.

Умови УЕД. 60 пацієнтів після інсульту (із залишковими функційними порушеннями) випадковим чином розподілені на дві групи – контрольну та експериментальну (по 30 осіб у кожній). Контрольна група отримувала стандартну програму телереабілітації без ТД-компонентів, тоді як експериментальна – індивідуалізовану програму з використанням ТД-моделі. Програма експериментальної групи передбачала попередню оцінку когнітивного статусу пацієнта та адаптацію вправ за допомоги алгоритмів, методів та засобів гібридної хмарної платформи HCET (англ. *Hybrid Cloud Environment for Telerehabilitation*) [21], а також застосування мультисенсорного біологічного зворотного зв'язку (БЗЗ) [41] (елементів технологій віртуальної та доповненої реальності, сенсорів руху, тощо). Враховано, що такі системи, як HCET можуть аналізувати дані пацієнта у реальному часі, персоналізувати терапію і коригуючи план занять [42], а віддалений моніторинг дає змогу контролювати дотримання пацієнтом вправ та оперативно реагувати на потребу змінення програм [21, 42].

Учасники УЕД. Вибірка дослідження складалася із 60 умовних пацієнтів старшого віку (середній вік 65 років) зі стійкими моторними й когнітивними порушеннями після ішемічного інсульту. Всі пацієнти мали подібний ступінь початкового дисфункціонування. Експеримент моделюється, як рандомізоване контрольоване дослідження з попереднім і кінцевим вимірами. *Зазначимо, що наведені результати є умовною (змодельованою) ілюстрацією гіпотетичного експерименту.*

*Метрики ефективності.* Оцінку результатів здійснювали за такими показниками ефективності реабілітації:

Приріст за шкалою FIM (англ. *Functional Independence Measure*) – сумарне підвищення балів незалежності пацієнта, що відображає зміну в потребі допомоги при виконанні повсякденних дій.

Рівень дотримання плану реабілітації (адерентність, англ. *adherence rate*) – відсоток виконаних пацієнтом призначених сеансів чи вправ. Дотримання лікування є ключовим чинником успіху реабілітації, і попередні дослідження відзначали його недостатню оптимальність при стандартних підходах.

Кількість завершених сеансів (запланованих до певного терміну) – практичне продовження метрики адерентності.

Зниження інтенсивності болю за візуально-аналоговою шкалою (ВАШ) – різниця між початковими й кінцевими балами за 10-бальною шкалою болю (чим більший приріст, тим більше зниження болю). ВАШ є загальноприйнятим інструментом для оцінювання болю у пацієнтів з неврологічними порушеннями.

Для кожного показника розраховано середні значення (M) і стандартні відхилення (SD) у контрольній та експериментальній групах. Статистичний аналіз – порівняння двох незалежних вибірок – здійснювався з допомогою непарного *t*-критерію Стьюдента ( $\alpha = 0,05$ ).

Таблиця 1 узагальнює середні результати за вибраними метриками. Як видно, експериментальна група продемонструвала вищі показники за всіма метриками порівняно з контрольною групою.

Опис результатів. Приріст за *FIM* у контрольній групі становив  $11,1 \pm 4,5$  балів, тоді як у експериментальній –  $17,4 \pm 4,7$ . Різниця між групами є статистично значущою ( $t = 5,36, p < 0,001$ ), що свідчить про більший функційний приріст пацієнтів ТД-програми. Відсоток дотримання реабілітаційної програми в контрольній групі склав у середньому  $75,1 \pm 9,9\%$ , а в експериментальній –  $84,7 \pm 6,9\%$  ( $t = 4,34, p < 0,001$ ). Тобто пацієнти з ТД-підтримкою охочіше виконували призначені завдання. Аналогічна тенденція спостерігалася за кількістю завершених сеансів: середнє число сеансів в експериментальній групі ( $18,4 \pm 1,5$  з 20 запланованих) значно перевищувало показник контрольної групи ( $14,6 \pm 3,0$ ) ( $t = 6,10, p < 0,001$ ). Щодо зниження болю, то експериментальна група мала середнє зниження  $4,1 \pm 1,6$  бала проти  $2,1 \pm 1,6$  у контрольній ( $t = 4,87, p < 0,001$ ), що теж підтверджує кращий результат на ТД-програмі.

Ці результати узгоджуються з теоретичними уявленнями про те, що системи телереабілітації на кшталт *HCET*, здатні забезпечувати адаптивний (пацієнт-центричний) під пацієнта підхід. Так, попередні дослідження показали, що ТД-підсилена телереабілітація дає змогу віддалено відстежувати прогрес пацієнта і вносити зміни в програму в реальному часі, що значно покращує результативність втручання [21, 42]. Наведені умовні дані УЕД ілюструють, що ТД підхід (індивідуалізована програма з когнітивним аналізом, та мультисенсорним БЗЗ) потенційно може суттєво підвищити ефективність телереабілітації.

Змодельований експеримент показує, що застосування ТД-моделі в телереабілітації дає вищі середні значення поліпшення функційного стану, кращу адерентність до програми та більшу кількість виконаних сеансів порівняно зі звичайною дистанційною реабілітацією. Усі наведені відмінності є статистично значущими. Отримані дані – умовні й ілюстративні – свідчать про потенційну перевагу ТД підходу: він дозволяє максимально враховувати індивідуальні

**Таблиця 1. Порівняльні результати зміни ключових показників реабілітації в контрольній та експериментальній групах (умовні дані УЕД)**

Метрика	Контрольна група (M ± SD)	Експериментальна група (M ± SD)	t-критерій (p)
Приріст <i>FIM</i> , бали	11,1 ± 4,5	17,4 ± 4,7	$t = 5,36, p < 0,001$
Рівень дотримання програми, %	75,1 ± 9,9	84,7 ± 6,9	$t = 4,34, p < 0,001$
Завершених сеансів	14,6 ± 3,0	18,4 ± 1,5	$t = 6,10, p < 0,001$
ВАШ	2,1 ± 1,6	4,1 ± 1,6	$t = 4,87, p < 0,001$

потреби пацієнтів та оперативно коригувати план реабілітації. Проте слід мати на увазі гіпотетичний характер експерименту, результати потребують верифікації на реальних клінічних дослідженнях.

Наведене УЕД подано у стислому виді, оскільки його повний опис виходить за межі цієї статті. Докладна інформація про організацію та симуляцію експерименту в хмарному середовищі *HCET*, разом із повним набором даних, доступна в [43].

## **Виклики та пріоритети подальших досліджень**

Результати змодельованого експерименту у *HCET* підтвердили ефективність ТД персоналізованих програм. Наступним кроком має стати тестування комбінованих методик, зокрема інтеграції *VR / AR* із когнітивно-поведінковою терапією та нейромодуляцією, що потенційно підвищить мотивацію пацієнтів і стимулюватиме нейропластичність.

Масове впровадження *Digital health* та телереабілітації потребує досліджень, які гарантуватимуть рівний доступ до сервісів, незалежно від соціально-економічного статусу, та забезпечуватимуть збереження людяності взаємодії пацієнта і фахівця у цифровому середовищі.

Подальший розвиток *5G / 6G*, *edge*-обчислень і блокчейн-реєстрів відкриває можливості для мінімізації затримок, прозорого керування даними та безпечної інтеграції між клініками; ефективність цих технологій слід перевірити в умовах реального навантаження *HCET*.

Конвергенція міждисциплінарних знань, підсилена хмарними архітектурами та елементами штучного інтелекту, залишається ключовим чинником на шляху до перетворення персоналізованої ЦОЗ (телереабілітації зокрема) на стандарт практики, підтверджений етичними, соціальними й технологічними критеріями якості.

## **Висновки**

Трансдисциплінарний підхід продемонстрував як методологічну обґрунтованість, так і практичну ефективність для ЦОЗ. УЕД у гібридному хмарному середовищі *HCET* підтвердив суттєві клінічні переваги персоналізованої ШІ-адаптованої телереабілітації: приріст за шкалою *FIM* зріс на 57 %, адерентність – на 13 %, кількість завершених сеансів – на 26 %, а інтенсивність болю зменшилася удвічі порівняно зі стандартною програмою.

Отримані показники свідчать, що ТД-орієнтовані цифрові платформи здатні забезпечити доступний, персоналізований і економічно доцільний догляд, особливо для пацієнтів, які не мають регулярного доступу до очної реабілітації.

Наступні кроки передбачають перспективні клінічні випробування для довгострокової валідації результатів, стандартизацію протоколів інтеграції та детальне опрацювання етичних і соціальних наслідків масштабного впровадження таких систем.

ЛІТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Malakhov K.S. Insight into the Digital Health System of Ukraine (eHealth): Trends, Definitions, Standards, and Legislative Revisions. *International Journal of Telerehabilitation*, 2023, Vol. 15 (2). <https://doi.org/10.5195/ijt.2023.6599>
2. Palagin O.V. Information technology tools for controlled evolution. *Problems of Control and Informatics*, 2021, Vol. 66 (5), 104–123. <https://doi.org/10.34229/1028-0979-2021-5-9>
3. Shyrovkov V. Evolution as universal natural law (prolegomena to the future general evolution theory). *Bionics of Intelligence*, 2017, Vol. 88 (1), 3–14. [https://doi.org/10.30837/bi.2018.1\(90\).01](https://doi.org/10.30837/bi.2018.1(90).01)
4. Bostrom N. A History of Transhumanist Thought. *Journal of Evolution and Technology*, 2005, Vol. 14(1), 1–25. URL: <http://jetpress.org/volume14/freitas.html>
5. Piaget J. L'Épistémologie des Relations Interdisciplinaires. In R. Schwarz (Ed.). *Wissenschaft als interdisziplinäres Problem, Teil 1*. De Gruyter, 1974, 154–172. <https://doi.org/10.1515/9783112415504-006>
6. Jantsch E. *Technological Planning and Social Futures*. Littlehampton Book Services Ltd, 1972. URL: <https://archive.org/details/technologicalpla0000jant>
7. Palagin O.V. Transdisciplinarity Problems and the Role of Informatics. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2013, Vol. 49 (5), 643–651. <https://doi.org/10.1007/s10559-013-9551-y>
8. Palagin O.V., Petrenko M.G., Kryvyi S., Boyko M., Malakhov K.S. *Ontology-Driven Processing of Transdisciplinary Domain Knowledge*. Iowa State University Digital Press, 2023. <https://doi.org/10.31274/isudp.2023.140>
9. Palagin O.V., Petrenko M.G. Methodological Foundations for Development, Formation and IT-support of Transdisciplinary Research. *Journal of Automation and Information Sciences*, 2018, Vol. 50 (10), 1–17. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v50.i10.10>
10. Palagin O.V., Kurgaev O.P., Shevchenko A.I. The Noosphere Paradigm of the Development of Science and Artificial Intelligence. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2017, Vol. 53 (4), 503–511. <https://doi.org/10.1007/s10559-017-9952-4>
11. Vernadsky V.I. The biosphere and the noosphere. *American Scientist*, 1945, Vol. 33 (1), 1–12. URL: [https://monoskop.org/images/5/59/Vernadsky\\_WI\\_1945\\_The\\_Biosphere\\_and\\_the\\_Noosphere.pdf](https://monoskop.org/images/5/59/Vernadsky_WI_1945_The_Biosphere_and_the_Noosphere.pdf)
12. Palagin O.V., Petrenko M.G., Malakhov K.S. Challenges and Role of Ontology Engineering in Creating the Knowledge Industry: A Research-Related Design Perspective. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2024, Vol. 60 (4), 633–645. <https://doi.org/10.1007/s10559-024-00702-6>
13. Malakhov K.S., Petrenko M.G., Cohn E. Developing an ontology-based system for semantic processing of scientific digital libraries. *South African Computer Journal*, 2023, Vol. 35 (1), 19–36. <https://doi.org/10.18489/sacj.v35i1.1219>
14. Palagin O.V., Petrenko M.G., Velychko V.Yu., Malakhov K.S. Development of formal models, algorithms, procedures, engineering and functioning of the software system “Instrumental complex for ontological engineering purpose.” *CEUR Workshop Proceedings*, 2014, Vol. 1843, 221–232. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-1843/221-232.pdf>
15. Petrenko M.G., Cohn E., Shchurov O., Malakhov K.S. Ontology-Driven Computer Systems: Elementary Senses in Domain Knowledge Processing. *South African Computer Journal*, 2023, Vol. 35 (2), 127–144. <https://doi.org/10.18489/sacj.v35i2.17445>
16. Palagin O.V., Kaverinskiy V.V., Malakhov K.S., Petrenko M.G. Fundamentals of the Integrated Use of Neural Network and Ontolinguistic Paradigms: A Comprehensive Approach. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2024, Vol. 60 (1), 111–123. <https://doi.org/10.1007/s10559-024-00652-z>
17. Ramesh S. *Will LLMs make Structured Healthcare Data Obsolete?* (18 Oct. 2023). URL: <https://www.youtube.com/watch?v=KCKYdR7Otg4>

18. Palagin O.V. An Ontological Conception of Informatization of Scientific Investigations. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2016, Vol. 52 (1), 1–7. <https://doi.org/10.1007/s10559-016-9793-6>
19. Kurgaev O.P., Palagin O.V. Rehabilitation According to the Biological Feedback. *11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, 2021, 1170–1175. <https://doi.org/10.1109/IDAACS53288.2021.9660953>
20. Roco M.C. NBIC. In Bainbridge W.S., Roco M.C. (Eds.), *Handbook of Science and Technology Convergence*, 209–226. Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-07052-0\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-319-07052-0_16)
21. Malakhov K.S. Innovative Hybrid Cloud Solutions For Physical Medicine and Telerehabilitation Research. *International Journal of Telerehabilitation*, 2024, Vol. 16 (1), Article 1. <https://doi.org/10.5195/ijt.2024.6635>
22. Nasr A., Laschowski B., McPhee J. Myoelectric Control of Robotic Leg Prostheses and Exoskeletons: A Review. *45th Mechanisms and Robotics Conference (MR)*, 2021, Vol. 8A, V08AT08A043. <https://doi.org/10.1115/DETC2021-69203>
23. Sanchez A., Rossos T., Mihailidis A., Laschowski B. Preliminary Development of a Robotic Hip-Knee Exoskeleton With 3D-Printed Backdrivable Actuators. *47th Mechanisms and Robotics Conference (MR)*, 2023, Vol. 8, V008T08A072. <https://doi.org/10.1115/DETC2023-116406>
24. Kaverinsky V.V., Malakhov K.S. Natural Language-Driven Dialogue Systems for Support in Physical Medicine and Rehabilitation. *South African Computer Journal*, 2023, Vol. 35 (2), 119–126. <https://doi.org/10.18489/sacj.v35i2.17444>
25. Palagin O.V., Kaverinsky V.V., Petrenko M.G., Malakhov K.S. Digital Health Systems: Ontology-Based Universal Dialog Service for Hybrid E-Rehabilitation Activities Support. *IEEE 12th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, 2023, Vol. 1, 84–89. <https://doi.org/10.1109/IDAACS58523.2023.10348639>
26. Palagin O.V., Kaverinskiy V.V., Litvin A., Malakhov K.S. OntoChatGPT Information System: Ontology-Driven Structured Prompts for ChatGPT Meta-Learning. *International Journal of Computing*, 2023, Vol. 22 (2), 170–183. <https://doi.org/10.47839/ijc.22.2.3086>
27. *Conceptual Models for Clinical Data Repository Implementation*. 2022. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=uw0a4HAX7mc>
28. Ramesh S. *Generative AI, Structured Data & openEHR*. (10 Jun. 2024). URL: <https://www.youtube.com/watch?v=XUp99f8C5us>
29. Opanasenko V.M., Fazilov S.K., Mirzaev O.N., Kakharov S.S. ugli. An Ensemble Approach To Face Recognition In Access Control Systems. *Journal of Mobile Multimedia*, 2024, Vol. 20 (3), 749–768. <https://doi.org/10.13052/jmm1550-4646.20310>
30. Opanasenko V.M., Fazilov Sh.Kh., Radjabov S.S., Kakharov Sh.S. Multilevel Face Recognition System. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2024, Vol. 60 (1), 146–151. <https://doi.org/10.1007/s10559-024-00655-w>
31. Kurgaev O.P. Extension of the Metalanguage of Normal Forms of Knowledge. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2020, Vol. 56 (6), 1021–1028. <https://doi.org/10.1007/s10559-020-00322-w>
32. Kurgaev O.P., Grigoriev S.N. Metalanguage of Normal Forms of Knowledge. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2016, Vol. 52 (6), 839–848. <https://doi.org/10.1007/s10559-016-9885-3>
33. Busti C., Gamboni A., Calabrò G., Zampolini M., Zedde M., Caso V., Corea F. Telesroke: Barriers to the Transition. *Frontiers in Neurology*, 2021, Vol. 12. <https://doi.org/10.3389/fneur.2021.689191>
34. *Remote Patient Monitoring Playbook*. American Medical Association. 2022. URL: <https://www.ama-assn.org/system/files/ama-remote-patient-monitoring-playbook.pdf>

35. *Telehealth Implementation Playbook*. American Medical Association. 2022. URL: <https://www.ama-assn.org/system/files/ama-telehealth-playbook.pdf>
36. Stucki G., Zampolini M., Juocevicius A., Negrini S., Christodoulou N. Practice, science and governance in interaction: European effort for the system-wide implementation of the International Classification of Functioning, Disability and Health (ICF) in Physical and Rehabilitation Medicine. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine*, 2017, Vol. 53 (2), 299–307. <https://doi.org/10.23736/S1973-9087.16.04436-1>
37. Pammi M., Shah P.S., Yang L.K., Hagan J., Aghaeepour N., Neu J. Digital twins, synthetic patient data, and in-silico trials: Can they empower paediatric clinical trials? *The Lancet Digital Health*, 2025, Vol. 7 (5), 100851. <https://doi.org/10.1016/j.landig.2025.01.007>
38. Pathmanathan P., Aycok K., Badal A., Bighamian R., Bodner J., Craven B.A., Niederer S. Credibility assessment of in silico clinical trials for medical devices. *PLOS Computational Biology*, 2024, Vol. 20 (8), e1012289. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1012289>
39. Müller A., Kraus S., Arimond R., Kunczik J., Rossaint R., Czaplik M., Follmann A. Telemedicine in civil protection: A controlled simulation study for the analysis of patient care. *Digital Health*, 2024, Vol. 10, 20552076241272662. <https://doi.org/10.1177/20552076241272662>
40. Ringeval M., Etindele Sosso F.A., Cousineau M., Paré G. Advancing Health Care With Digital Twins: Meta-Review of Applications and Implementation Challenges. *Journal of Medical Internet Research*, 2025, Vol. 27, e69544. <https://doi.org/10.2196/69544>
41. Kurgaev O.P., Palagin O.V., Malakhov K.S., Semykopna T.V. *Device for the Rehabilitation of People With Disabilities*, 2022, (Patent No. 151356). URL: <https://sis.nipo.gov.ua/en/search/detail/1697507/>
42. Calabrò R.S., Mojdehdehbaheer S. AI-Driven Telerehabilitation: Benefits and Challenges of a Transformative Healthcare Approach. *AI*, 2025, Vol. 6 (3), 62 p. <https://doi.org/10.3390/ai6030062>
43. Malahov K.S. *Simulation-based study (in-silico trials) on the effectiveness of a transdisciplinary approach to developing personalized telerehabilitation programs*. [Dataset]. Zenodo, 2025. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15785402>

Отримано / Received: 19.12.2024

M.G. PETRENKO, DSc (Engineering), Leading Researcher,  
Microprocessor Technology Department of the  
V.M. Hlushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine,  
40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0001-6440-0706>  
petrng@ukr.net

K.S. MALAKHOV, Researcher,  
Microprocessor Technology Department of the  
V.M. Hlushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine,  
40, Hlushkova Akad. ave., Kyiv, 03187, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-3223-9844>  
k.malakhov@outlook.com

#### METHODOLOGY AND PRACTICE OF INTERDISCIPLINARY KNOWLEDGE CONVERGENCE IN DIGITAL HEALTH

**Introduction.** Transdisciplinary integration of medicine, informatics, engineering and social-behavioral sciences is increasingly viewed as essential for scalable, patient-centered digital health solutions. This study builds on a transdisciplinary framework

to explore how converging disciplinary knowledge can advance remote rehabilitation services.

**Methods.** A simulation study was conducted in the Hybrid Cloud Environment for Telerehabilitation HCET. Sixty virtual post-stroke patients were randomly assigned to a control group (standard telerehabilitation) or an experimental group (HCET-driven, AI-adapted program). Key end points included change on the Functional Independence Measure (FIM), session adherence, number of completed sessions (max = 20), and self-reported pain reduction.

**Results.** The HCET-adapted program produced a 57% greater mean FIM gain ( $17.4 \pm 4.7$  vs  $11.1 \pm 4.5$  points), a 13% higher adherence rate, a 26% increase in completed sessions, and a two-fold reduction in pain scores compared with controls.

**Discussion and conclusions.** Findings suggest that transdisciplinary-oriented digital platforms can deliver clinically and economically meaningful benefits, particularly for patients with limited access to in-person rehabilitation. Although based on simulated data, the results validate the proposed methodological framework and justify prospective real-world trials to confirm long-term effectiveness.

**Keywords:** *scientific worldview, transdisciplinarity, interdisciplinarity, convergent technologies, digital health, simulation study.*