



ГОЛОВЕНКО

Микола Якович — академік НАМН України, доктор біологічних наук, професор, завідувач відділу біомедицини Фізико-хімічного інституту ім. О.В. Богатського НАН України

АЛГОРИТМІЧНА ФАРМАКОЛОГІЯ: ВІД ФАРМАКОТЕРАПІЇ ДО ТЕРАПІЇ АЛГОРИТМАМИ

У статті запропоновано концепцію алгоритмічної фармакології як нової міждисциплінарної галузі біомедицинської науки, що вивчає алгоритми та системи штучного інтелекту як потенційні терапевтичні агенти інформаційної природи. Проведено аналіз еволюції терапевтичних парадигм та обґрунтовано закономірність переходу медицини до інформаційного рівня лікувального впливу. Обговорено структурну модель дисципліни, що містить теоретичний, експериментальний та клінічний рівні. Обґрунтовано можливість перенесення фармакологічних категорій (доза, фармакодинаміка, фармакокінетика) на алгоритмічні системи на основі принципу структурного ізоморфізму. Особливу увагу приділено класифікації алгоритмів, формуванню «фармакопеї алгоритмів», питанням регуляторної моделі, алгоритмічної безпеки, етичним аспектам та перспективам інтеграції алгоритмічної терапії у клінічну практику. Запропоновано рівневу модель алгоритмічної автономності та окреслено вимоги до впровадження терапевтичних систем штучного інтелекту.

Ключові слова: алгоритмічна фармакологія, алгоритмічна терапія, ШІ у медицині, алгоритмодинаміка, алгоритмокінетика, алгоритмічна доза, регуляторна модель ШІ, персоналізована медицина, інформаційна медицина.

Наразі ми переживаємо етап глибоких технологічних трансформацій, який у сучасній науковій та економічній літературі визначають як четверту промислову революцію (Industry 4.0). Її сутність полягає у поєднанні цифрових технологій, автоматизації виробництва, обробки великих даних та систем штучного інтелекту (ШІ), що радикально змінює принципи організації економіки, наукових досліджень та суспільного управління [1]. У цих умовах галузі промисловості та окремі підприємства дедалі більше орієнтуються на автоматизовані системи прийняття рішень, інтелектуальне обладнання, цифрові платформи, які забезпечують підвищення ефективності виробництва, оптимізацію використання ресурсів і трансформацію структури праці.

У цьому контексті Україна також формує власну інфраструктуру розвитку ШІ. Зокрема, ведеться робота над створенням національної великої мовної моделі (Large Language Model,

LLM), яка має стати базовою технологічною платформою для державних цифрових сервісів, інтелектуальних чатботів та ШІ-асистентів. Реалізацію цього проекту здійснює Міністерство цифрової трансформації України у співпраці з науковими й технологічними партнерами. Українці навіть уже обрали назву для такої першої національної великої мовної моделі — Сяйво (Siaivo). Важливість розвитку і застосування алгоритмів для наукової системи держави було підкреслено також під час засідання Президії НАН України 16 липня 2025 р., де наголошувалося на необхідності формування єдиної академічної стратегії у сфері досліджень і впровадження ШІ. Така стратегія покликана забезпечити інтеграцію української науки у глобальний простір досліджень ШІ, посилити її спроможність не лише генерувати фундаментальні знання, а й створювати прикладні інноваційні рішення для потреб оборони, безпеки критичної інфраструктури, підвищення стійкості держави та повоєнного відновлення України.

Особливо помітним є вплив технологій ШІ на сферу охорони здоров'я. Медична галузь накопичує величезні масиви клінічних, геномних та епідеміологічних даних, що створює передумови для застосування алгоритмічних методів аналізу та машинного навчання. Використання даних про пацієнтів, що охоплюють тривалий проміжок часу, і великих медичних баз даних відкриває можливості для принципово нових підходів до діагностики, прогнозування перебігу захворювань та персоналізованого лікування [2]. Інтеграція інтелектуальних систем у медичну практику сприяє підвищенню точності діагностики, підтримці клінічних рішень, оптимізації планування лікування, що потенційно дозволяє зменшити кількість медичних помилок та поліпшити результати лікування пацієнтів [3, 4].

Важливим етапом у розвитку прикладного ШІ стала поява попередньо навчених мовних моделей великого масштабу, таких як BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers), GPT (Generative Pre-trained Transformer), та їх численних модифікацій [5]. Ці

моделі навчаються на великих текстових даних і здатні виконувати широкий спектр завдань з оброблення природної мови — від автоматизованого аналізу та структурування клінічної документації до узагальнення змісту наукових публікацій і підтримки медичних досліджень.

Водночас технологічні зрушення впливають не лише на інструменти дослідження, а й на саму мову науки. Протягом останніх десятиліть у науковому дискурсі сформувалися нові поняття, такі як «штучний інтелект у медицині», «алгоритмічна біологія», «алгоритмічна економіка». Те, що раніше сприймалося як футуристична перспектива, сьогодні стало органічною частиною сучасного наукового знання. Історично розвиток науки часто відбувався саме через синтез різних дисциплін, і свого часу поява таких напрямів, як біофізика, біохімія або молекулярна медицина, також означала інтелектуальний прорив і формування нових міждисциплінарних дослідницьких парадигм.

У цьому контексті запропонована нами концепція алгоритмічної фармакології постає не як термінологічна новація чи футуристична метафора, а як закономірний етап еволюції наукової раціональності в медицині. Фармакологія історично пройшла складний шлях трансформації: від описової дисципліни, що спиралася на спостереження та емпіричний досвід, до експериментальної науки з чітко визначеними механізмами дії речовин, а згодом і до молекулярного та структурно-орієнтованого конструювання лікарських засобів. Кожен із цих етапів супроводжувався зміною інструментарію пізнання та розширенням уявлень про природу терапевтичного впливу.

Сучасна фармакологія функціонує в умовах безпрецедентного накопичення таких даних, як геномні та протеомні бази, біохімічні профілі, реєстри реальної клінічної практики, що формують складні багатовимірні інформаційні масиви [6]. Їхній обсяг і структурна складність перевищують можливості індивідуального аналітичного опрацювання, що зумовлює необхідність залучення алгоритмічних методів аналізу. У цьому сенсі алгоритм перестає бути лише допоміжним інструментом обчислен-

ня — він стає когнітивним продовженням дослідника, співучасником процесу формування гіпотез, інтерпретації даних і прийняття клінічних рішень.

У цій статті ми розглянемо алгоритмічну фармакологію як міждисциплінарний науковий напрям на перетині медицини, фармакології, біоінформатики та інформатики. У межах цього підходу алгоритм трактується не лише як засіб підтримки прийняття рішень, а й як форма терапевтичного втручання, здатна модифікувати перебіг захворювання, поведінкові патерни пацієнта або фізіологічні параметри організму, подібно до того, як це здійснюють лікарські препарати, біологічні агенти чи медичні процедури.

Це відкриває перспективу формування нової парадигми, де поряд із хімічними та біологічними чинниками з'являється алгоритмічний чинник як самостійний об'єкт наукового аналізу й клінічного застосування.

Для підтвердження такої концепції ми використали принцип аналогії, який дозволяє обґрунтувати перенесення фармакологічних категорій на алгоритмічні системи за умови збереження структурної відповідності та методологічної обережності [7]. Аналогія в цьому разі не є риторичним прийомом і не зводиться до метафоричного порівняння «алгоритм як ліки». Вона набуває наукової ваги лише тоді, коли між системами існує функціональна відповідність структурних елементів. Визначальну роль тут відіграє ізоморфізм, який є умовою коректної аналогії, оскільки саме структурна подібність, а не поверхнева схожість, уможливорює продуктивне перенесення понять між науковими моделями. У випадку алгоритмічної фармакології ізоморфізм проявляється у відповідності між дозою препарату та інтенсивністю алгоритмічного впливу, фармакодинамікою та механізмом інформаційної дії алгоритму, фармакокінетикою та часово-просторовою динамікою алгоритмічної взаємодії, токсичністю та ризиками алгоритмічних помилок або упереджень.

Отже, у нашому випадку структурний ізоморфізм дозволяє розглядати алгоритмічну фармакологію не як метафору, а як концепту-

ально обґрунтовану модель нової дисципліни, що інтегрує інформаційні системи у фармакологічну парадигму.

Алгоритм як інструмент, агент і творець в алгоритмічній фармакології. Алгоритмічна фармакологія постає не просто як нова назва, а як нова оптика бачення фармакологічної реальності. Якщо класична традиція розглядала лікарський засіб як речовину, що взаємодіє з біологічною мішенню, то сьогодні дедалі очевиднішим є те, що поряд із молекулою діє алгоритм. Іноді він є приладом, іноді — творцем нових препаратів, а іноді — терапевтичним чинником [8].

Перший напрям можна умовно назвати інструментальним, оскільки такі алгоритми опрацьовують масиви даних клінічних досліджень, моделюють фармакокінетичні процеси та прогнозують побічні реакції лікарських засобів. У цьому разі вони є вимірювальними пристроями нового типу, оскільки не фіксують світло чи електричний сигнал, а виявляють статистичні й структурні зв'язки. Алгоритм стає більш точним, масштабованим цифровим посередником, здатним працювати з рівнями складності, що перевищують людське сприйняття.

Другий напрям — генеративний. У ньому алгоритм бере участь у створенні нових лікарських засобів. Традиційно відкриття препарату потребувало багаторічного перебору різноманітних сполук та поступового уточнення структури задля ефективної терапевтичної дії [9]. Сьогодні алгоритмічні моделі здатні прогнозувати взаємодію молекул із мішенями, генерувати нові хімічні структури, оптимізувати їхню стабільність та біодоступність. Алгоритм стає співучасником творчого процесу, не замінюючи хіміка чи фармаколога, а підсилюючи їхню інтуїцію. Виникає нова форма наукової творчості — так зване цифрове проектування лікарських засобів.

Третій напрям є найбільш концептуально новим, у ньому алгоритм перестає бути лише інструментом і набуває статусу терапевтичного агента. У певних клінічних ситуаціях лікувальний ефект досягається не через хімічну



Рис. 1. Еволюція терапевтичних парадигм у медицині

молекулу, а через алгоритмічні системи, що коригують поведінку, підтримують когнітивні функції, оптимізують режим терапії або регулюють параметри медичних пристроїв у реальному часі [10]. У цьому разі алгоритм функціонує подібно до лікарського засобу, має показання та протипоказання, проходить клінічну валідацію, оцінюється за ефективністю та безпечністю. Терапевтичний ефект виникає завдяки інформаційній дії, і це не заперечує фармакологію, а розширює її межі, оскільки поряд із хімічною взаємодією виникає інформаційна фармакодинаміка. На нашу думку, третій напрям відповідає концепції алгоритмічної фармакології, в якій алгоритм стає не зовнішнім додатком до фармакології, а її внутрішнім методологічним принципом.

Передумови формування алгоритмічної фармакології. Еволюція терапевтичних парадигм у медицині демонструє поступовий перехід від матеріального до молекулярного, а згодом і до інформаційного рівня впливу на організм (рис. 1).

Хірургія стала першою великою терапевтичною революцією, оскільки лікування в ній досягалося фізичним втручанням. Фармакотерапія змінила цей підхід, перемістивши акцент із механічного усунення патології на хімічну модифікацію біологічних процесів. Сьогодні медицина стоїть на порозі третьої трансформації — алгоритмотерапії, в якій терапевтичний ефект реалізується через обробку інформації та модифікацію рішень, поведінки або клінічних процесів.

Однак жодна парадигма не виникає у вакуумі. Як хірургія спиралася на анатомію, а фармакотерапія на біохімію та молекулярну біологію, так і алгоритмотерапія має свої наукові й технологічні передумови. Однією з основоположних передумов є стрімкий прогрес у сфері медичного ШІ. Сучасні алгоритми здатні аналізувати величезні масиви клінічних даних, прогнозувати перебіг хвороби, підтримувати прийняття рішень лікарем та моделювати терапевтичні стратегії [11]. Саме поєднання потужності обчислень і здатності алгоритмів навчатися на наборах даних створює основу для концепції алгоритмічного терапевтичного агента, аналогічного лікарському препарату в класичній фармакології.

Цифрові терапії включають програмні рішення та мобільні платформи, що здійснюють терапевтичний вплив через інтерактивні інтерфейси, відстежуючи поведінку пацієнта і надаючи персоналізовані рекомендації [12]. Вони створюють умови для системного застосування алгоритмів як активних терапевтичних агентів.

Не менш важливим чинником є концепція персоналізованої медицини, яка передбачає індивідуалізацію лікування на основі генетичних, біохімічних та поведінкових характеристик пацієнта. Алгоритми ШІ здатні інтегрувати ці дані, формуючи персоналізовані терапевтичні стратегії, що підвищують ефективність втручань і мінімізують ризики [13]. У цьому контексті алгоритмічна фармакологія розглядає алгоритми як «інформаційні ліки», здатні

модулювати індивідуальний клінічний стан пацієнта, подібно до того, як фармакотерапія підбирає дози лікарських засобів.

Велику роль відіграють масиви структурованої та неструктурованої інформації про пацієнтів, їхній стан, перебіг хвороб та результати лікування. Ці дані забезпечують навчання алгоритмів, створення прогностичних моделей та оцінку ефективності терапевтичних втручань [14]. Завдяки їм можна визначати оптимальні параметри «алгоритмічної дози», прогнозувати побічні ефекти та виявляти взаємодії між алгоритмічними втручаннями і традиційними терапіями.

Алгоритми як фундамент алгоритмічної фармакології. Роздуми про алгоритмічну фармакологію неминуче приводять до фундаментального питання: що саме створює терапевтичний потенціал алгоритмів і чому їх можна розглядати як новий клас терапевтичних агентів? Відповідь на це питання пов'язана з природою самих алгоритмів як основи ШІ. Алгоритм у найзагальнішому розумінні є впорядкованою послідовністю логічних операцій, спрямованих на розв'язання певного завдання. У системах ШІ алгоритми виконують роль механізмів, що дозволяють машинам аналізувати інформацію, навчатися на даних, робити прогнози і приймати рішення. Саме алгоритми надають інтелектуальним системам здатність до адаптації та оптимізації поведінки в складних умовах.

У медичному контексті алгоритми починають виконувати функції, що виходять за межі простого аналізу даних. Вони дедалі частіше беруть участь у формуванні терапевтичних рішень, тобто переходять від ролі інструментів аналізу до ролі активних учасників терапевтичного процесу.

Особливо важливою характеристикою сучасних алгоритмів є їхня здатність до навчання. Алгоритми машинного навчання та нейронні мережі можуть виявляти складні закономірності у великих масивах медичних даних, які часто залишаються непоміченими в традиційному клінічному аналізі. Завдяки цьому вони можуть не лише підтримувати прийняття

клінічних рішень, а й пропонувати нові, раніше неочевидні терапевтичні підходи. У цьому контексті алгоритм можна розглядати як інформаційний терапевтичний агент, дія якого реалізується через зміну інформаційного середовища пацієнта та лікаря. Якщо фармакологічні препарати впливають на біохімічні процеси організму, то алгоритми здатні впливати на когнітивні, поведінкові та організаційні механізми лікування. Такий вплив може проявлятися у формі персоналізованих рекомендацій, адаптивного моніторингу стану пацієнта, оптимізації лікувальних протоколів або модифікації поведінкових стратегій.

Класична модель регулювання медичних виробів історично ґрунтується на припущенні про їхню функціональну стабільність і після проходження процедур сертифікації та реєстрації продукт розглядають як технічно завершений і незмінний. Однак системи машинного навчання, що застосовуються в медицині, мають принципово іншу природу. Багато з них здатні адаптуватися до нових даних, змінювати параметри моделей або проходити періодичні оновлення після впровадження у клінічну практику. Така динамічність створює нові виклики для традиційних регуляторних підходів, оскільки ефективність і безпека алгоритму можуть еволюціонувати разом із накопиченням даних та зміною середовища застосування.

Для розв'язання цієї проблеми Управління з контролю за продуктами і ліками США (FDA) запропонувало концепцію *Predetermined Change Control Plan (PCCP)*, яка передбачає можливість попереднього визначення умов і меж майбутніх модифікацій алгоритму [15]. Такий підхід змушує розробника ще на етапі сертифікації задавати очікувані параметри оновлень моделі, допустимі межі її адаптації, а також визначати процедури перевірки якості та безпеки після внесення змін. Таким чином формується регуляторний механізм, здатний поєднати вимоги стабільності медичного виробу з еволюційною природою алгоритмічних систем. Ця концепція є складовою ширшої регуляторної рамки для впровадження штучного інтелекту в медицині.

Важливим доповненням до цієї рамки є формування стандартів, аналогічних фармацевтичним принципам належної виробничої практики (Good Manufacturing Practice, GMP). У сфері медичного ШІ таким стандартом поступово стає концепція Good Machine Learning Practice (GMLP), яка визначає ключові принципи відповідального розроблення та використання алгоритмів [16]. До них належать управління даними, контроль потенційних алгоритмічних упереджень, ретельна валідація моделей, забезпечення прозорості їхньої роботи, а також безперервний моніторинг ефективності після впровадження в клінічну практику.

У сукупності ці підходи свідчать про поступове формування нової регуляторної парадигми, в межах якої алгоритмічні системи розглядають не просто як програмні інструменти, а як особливий клас медичних технологій, що розширює можливості сучасної медицини.

Структурно-дисциплінарна модель алгоритмічної фармакології. Як і класична фармакологія, алгоритмічна фармакологія може бути повноцінною багаторівневою дисципліною, і в її структурі можна виділити кілька основних розділів.

1. *Теоретична алгоритмічна фармакологія* — це фундаментальний розділ, що формує понятійний і математичний апарат дисципліни. Основними напрямками формування концепції алгоритму як терапевтичного агента є моделювання інформаційної взаємодії алгоритм — пацієнт, розроблення понять «алгоритмодинаміка», «алгоритмокінетика», «алгоритмічна доза», створення математичних моделей терапевтичного впливу алгоритмів, аналіз інформаційних механізмів лікування. Фактично цей розділ відповідає фундаментальній фармакології, але для інформаційних терапій.

2. *Експериментальна алгоритмічна фармакологія* — досліджує властивості алгоритмів у контрольованих умовах до їхнього клінічного застосування. До основних завдань належать такі: тестування алгоритмів на медичних даних, моделювання їхнього терапевтичного ефекту, аналіз ризиків і помилок алгоритмів, оцінка стабільності алгоритмів у різних умо-

вах. Методи можуть включати симуляції, цифрові клінічні моделі, тестування на великих масивах медичних даних.

3. *Клінічна алгоритмічна фармакологія* — досліджує застосування алгоритмів у реальній клінічній практиці. Основні напрями: оцінка терапевтичної ефективності алгоритмів, визначення оптимальної алгоритмічної дози, аналіз алгоритмічних побічних ефектів, взаємодії алгоритмів із медикаментозною терапією, клінічні випробування алгоритмів. У цьому розділі формується те, що можна назвати алгоритмотерапією.

4. *Безпекова алгоритмічна фармакологія* (аналог фармаконагляду) — вивчає ризики та побічні ефекти алгоритмів. Основні питання: алгоритмічні помилки, системні збої, когнітивне перевантаження пацієнта, вплив алгоритмів на клінічні рішення лікаря. Можна навіть говорити про алгоритмонагляд, систему постійного моніторингу безпеки медичних алгоритмів.

5. *Персоналізована алгоритмічна фармакологія* — досліджує індивідуальні реакції пацієнтів на алгоритмічні терапії. Її питання: поведінкові особливості, когнітивний стиль, медичні характеристики, цифрова грамотність.

6. *Порівняльна алгоритмічна фармакологія* — порівнює різні алгоритми між собою та алгоритмічну терапію з традиційною терапією, досліджує комбіноване лікування (алгоритми + медикаменти).

Наведена система дозволяє інтегрувати ШІ в медичну науку, стандартизувати оцінку терапевтичних алгоритмів, створити наукову основу цифрових терапій.

Механізми терапевтичної дії алгоритмів. Якщо розглядати алгоритми як потенційні терапевтичні агенти, постає ключове питання: як саме вони здатні здійснювати лікувальний вплив? Одним із найважливіших механізмів є *когнітивний вплив алгоритмів*. Системи ШІ здатні аналізувати клінічну інформацію, виявляти закономірності та пропонувати оптимальні терапевтичні рішення. У результаті вони впливають на процес клінічного мислення лікаря, допомагаючи йому оцінювати ризики, прогнозувати перебіг захворювання та

обирати найбільш ефективну стратегію лікування. Таким чином алгоритм стає своєрідним когнітивним модулем підтримки прийняття рішень, який розширює можливості людського інтелекту в складному медичному середовищі.

Іншим важливим аспектом є *вплив алгоритмів на поведінку пацієнтів*. Багато сучасних цифрових медичних систем здатні формувати індивідуальні рекомендації щодо способу життя, режиму приймання лікарських препаратів або контролю симптомів [17]. Алгоритми можуть адаптувати ці рекомендації відповідно до змінення стану пацієнта, що створює умови для динамічного управління поведінковими факторами здоров'я. Такий підхід особливо важливий у лікуванні хронічних захворювань, де поведінка пацієнта відіграє ключову роль у досягненні терапевтичного результату.

Сучасні алгоритмічні системи можуть здійснювати *безперервний моніторинг стану здоров'я*, використовуючи дані медичних пристроїв, мобільних додатків або електронних медичних записів. Це дозволяє виявляти ранні ознаки погіршення стану пацієнта і своєчасно коригувати лікування. Завдяки такому механізму алгоритмічна терапія набуває властивостей адаптивної системи управління здоров'ям, здатної реагувати на зміни клінічного стану в режимі реального часу.

Алгоритми машинного навчання можуть створювати *прогностичні моделі*, що дозволяють оцінювати ймовірність розвитку ускладнень, прогресування захворювання або неефективності терапії. Такий підхід переводить медицину від реактивної до проактивної моделі лікування, де терапевтичні рішення приймаються на основі прогнозу майбутніх подій.

Алгоритми здатні також *оптимізувати організацію медичної допомоги*, координуючи взаємодію між різними елементами системи охорони здоров'я. Вони можуть допомагати в розподілі ресурсів, плануванні лікувальних процесів та координації роботи медичних команд. У цьому випадку терапевтичний ефект досягається не через прямий вплив на пацієнта, а через поліпшення функціонування медичної системи загалом.

Фундаментальні параметри алгоритмічної терапії. Якщо розглядати алгоритми як інформаційні терапевтичні агенти, логічно застосувати до них деякі ключові поняття класичної фармакології.

Поняття *алгоритмічної дози* можна визначити як інтенсивність і частоту застосування алгоритмічного впливу в процесі лікування [18]. На відміну від фармакологічної дози, яка вимірюється кількістю хімічної речовини, алгоритмічна доза визначається параметрами взаємодії між алгоритмом та користувачем. До основних характеристик алгоритмічної дози можуть належати частота надання рекомендацій або надсилання повідомлень, тривалість взаємодії пацієнта з цифровою системою, кількість аналізованих клінічних параметрів та інтенсивність адаптації рекомендацій. Правильне визначення алгоритмічної дози має важливе значення, оскільки надмірна кількість рекомендацій може призвести до інформаційного перевантаження, тоді як недостатня активність алгоритму може зменшити його терапевтичну ефективність. Отже, як і у фармакології, існують певні оптимальні показники — терапевтичний індекс [19] і терапевтичне вікно алгоритмічного впливу [20].

Поняття *алгоритмодинаміки* можна розглядати як аналог фармакодинаміки [10]. Якщо фармакодинаміка описує взаємодію лікарського препарату з біологічними структурами організму, то алгоритмодинаміка досліджує взаємодію алгоритму з інформаційною, когнітивною та поведінковою системою людини. Алгоритмодинаміка охоплює механізми впливу алгоритмічних рекомендацій на клінічні рішення; зміну поведінки пацієнта під впливом цифрових інтервенцій; вплив алгоритмів на структуру медичного процесу; адаптацію терапевтичних стратегій у відповідь на зміну стану пацієнта. У цьому сенсі алгоритмодинаміка вивчає функціональний результат інформаційного впливу алгоритму, тобто те, як саме алгоритмічні рекомендації трансформуються у реальні клінічні дії.

Ще одним важливим аспектом є *алгоритмокінетика*, яка є концептуальним аналогом

фармакокінетики [10]. У фармакології фармакокінетика описує процеси всмоктування, розподілу, метаболізму та виведення лікарської речовини. У випадку алгоритмічних терапевтичних систем ці процеси можна інтерпретувати в термінах поширення, оброблення та оновлення інформації. Алгоритмокінетика може включати такі процеси, як надходження даних про стан пацієнта до алгоритму, обробка та аналіз цих даних, формування терапевтичних рекомендацій, поширення рекомендацій серед учасників медичного процесу, оновлення алгоритмічної моделі на основі нових даних.

Саме через запровадження понять алгоритмічної дози, алгоритмодинаміки та алгоритмокінетики алгоритмічна фармакологія поступово набуває рис повноцінної наукової дисципліни, здатної описувати інформаційну терапію, що доповнює традиційні біохімічні та фізіологічні методи лікування.

Класифікація алгоритмічних терапевтичних систем. За аналогією з фармакологічними групами алгоритми можна класифікувати відповідно до сфери їх терапевтичного застосування. *Класифікація алгоритмів за типом терапевтичної дії* (психотропні, кардіологічні, онкологічні тощо) є цілком обґрунтованою в межах концепції алгоритмічної фармакології, оскільки дозволяє систематизувати різноманітні алгоритмічні терапевтичні системи за аналогією з традиційними фармакологічними групами.

Алгоритми можна класифікувати також за способом їх впливу (*механізмом терапевтичної дії*). Так, поведінково-модульовальні алгоритми впливають на спосіб життя та поведінку пацієнта. Прогностичні алгоритми передбачають ризики розвитку захворювання або ускладнень. Моніторингові алгоритми безперервно аналізують біометричні дані. Рекомендаційні алгоритми формують клінічні рекомендації для лікаря або пацієнта. Пацієнтоорієнтовані алгоритми безпосередньо взаємодіють із пацієнтом, а лікар-орієнтовані підтримують прийняття клінічних рішень. Системні алгоритми оптимізують функціонування медичних систем.

Якщо розглядати алгоритмічну фармакологію як нову наукову дисципліну, логічним наступним кроком стає *створення системи стандартизації алгоритмічних терапевтичних агентів*. У класичній фармакології таку функцію виконує фармакопея — офіційне зібрання стандартів, яке містить опис лікарських засобів, вимоги до їхньої якості, показання до застосування, дозування та способи використання. За аналогією фармакопею алгоритмів можна розглядати як науково-методичний реєстр алгоритмічних терапевтичних агентів, у якому кожний алгоритм описано відповідно до стандартизованої структури.

Подібно до фармакопеї лікарських препаратів, для кожного алгоритму у фармакопеї можна запропонувати стандартну форму опису:

- назва алгоритму;
- унікальна назва або ідентифікаційний код алгоритмічної системи;
- класифікаційний код;
- код відповідно до алгоритмічної терапевтичної класифікації (АТСА);
- терапевтична група;
- клінічна сфера застосування (кардіологія, психіатрія, ендокринологія тощо);
- механізм алгоритмічної дії;
- опис того, як алгоритм впливає на клінічний процес (через прогнозування, поведінкову модифікацію, моніторинг або підтримку прийняття рішень);
- алгоритмічна доза;
- частота рекомендацій, тривалість взаємодії, обсяг аналізованих даних або інші параметри використання алгоритму;
- показання до застосування;
- клінічні ситуації, в яких алгоритм демонструє терапевтичну ефективність;
- протипоказання або обмеження;
- умови, за яких застосування алгоритму може бути недоцільним або небезпечним;
- алгоритмічні побічні ефекти;
- можливі негативні наслідки, наприклад інформаційне перевантаження, помилкові рекомендації або неправильна інтерпретація результатів;
- рівень клінічної доказовості;

- ступінь підтвердження ефективності алгоритму на основі клінічних досліджень.

Запровадження фармакопеї алгоритмів може мати важливе значення для розвитку алгоритмічної фармакології. У довгостроковій перспективі фармакопея алгоритмів може стати інструментом, що інтегрує алгоритмічні терапії в структуру сучасної медицини так само, як фармакопеї інтегрують лікарські препарати у фармакотерапію.

У класичній фармакології є низка символів, які відображають її сутність. Ми запропонували символ алгоритмічної фармакології (рис. 2), який має вигляд стилізованої капсули, поділеної на дві половини, що традиційно асоціюються з лікарськими препаратами. Таке зображення поєднує два смислові елементи: капсулу як символ класичної фармакології та лікарського засобу і мікросхему з мережевими зв'язками як символ алгоритмів та обробки даних. Загалом композиція передає ідею алгоритму як нового терапевтичного агента, де інформаційні технології стають аналогом лікарської речовини.

Переваги та потенційні ризики алгоритмічної терапії. Алгоритмічна терапія пропонує унікальні можливості для підвищення ефективності лікування, персоналізації медичних втручань та безперервного моніторингу пацієнтів. Водночас вона породжує нові етичні, клінічні та безпекові виклики, що потребують системного підходу, регуляторного контролю та постійного моніторингу алгоритмів. Гармонійне поєднання переваг і контролю ризиків визначає потенціал алгоритмічної терапії як нового класу медичних втручань, що потребує детального аналізу.

Однією з ключових переваг алгоритмічної терапії є підвищення ефективності лікування завдяки персоналізації та адаптивності алгоритмів. Вона також дозволяє реалізувати безперервний моніторинг стану пацієнта, що є особливо цінним у разі хронічних захворювань або для пацієнтів із високим ризиком ускладнень [10, 11]. Це забезпечує швидке реагування, зменшує частоту ускладнень і дозволяє лікарю приймати рішення на основі об'єктивної та актуальної інформації.

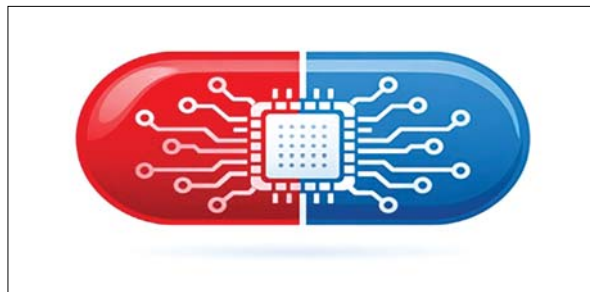


Рис. 2. Запропонований символ алгоритмічної фармакології

Разом із перевагами з'являються й етичні та клінічні ризики, характерні для будь-яких алгоритмічних систем у медицині. Алгоритми можуть містити приховані упередження, що виникають через тренувальні дані, або формувати рекомендації, які не враховують індивідуальні соціальні та психологічні особливості пацієнта. Крім того, надмірна залежність від алгоритмів у прийнятті рішень може призвести до зниження рівня клінічного мислення та критичного аналізу з боку лікарів. Важливою проблемою є також прозорість алгоритмів і пояснюваність їхніх рішень для пацієнта та клініциста.

Ще одним критично важливим аспектом є алгоритмічна безпека. Вона охоплює такі технічні і клінічні аспекти, як надійність обробки даних, захист від кіберзагроз, контроль якості та оновлення моделей відповідно до нових клінічних знань. Неправильна або несвоєчасна модифікація алгоритму може призвести до небезпечних рекомендацій, що створює потенційний ризик для життя пацієнтів. Тому впровадження стандартів алгоритмічної безпеки та постійний аудит моделей стають обов'язковими складовими алгоритмічної терапії.

Етичні та соціальні аспекти алгоритмічної фармакології. Розвиток алгоритмічної фармакології відкриває перед медициною величезні можливості, але водночас зумовлює нові етичні та соціальні виклики.

Одним із ключових етичних аспектів є *прозорість алгоритмів* [11]. Складні моделі машинного навчання та нейронні мережі часто

працюють як «чорні скриньки», що ускладнює розуміння логіки прийняття рішень. Для пацієнта і клініциста важливо, щоб алгоритмічні рекомендації були пояснюваними, адже від цього залежить довіра до терапії та готовність дотримуватися порад.

Соціальні ризики пов'язані з конфіденційністю медичних даних. Алгоритми потребують доступу до великих масивів електронних медичних записів, геномних даних, даних носимих пристроїв, і порушення приватності може мати серйозні наслідки, такі як дискримінація, стигматизація пацієнтів та втрата довіри до систем охорони здоров'я.

Іншим важливим аспектом є *справедливість* алгоритмічних терапевтичних систем [20]. Алгоритми можуть відтворювати або посилювати наявні соціальні та медичні упередження, якщо їх навчати на історичних даних із нерівномірним представництвом груп пацієнтів. Це може призвести до неоднакової якості терапії та порушення принципу рівного доступу до лікування.

Широке впровадження алгоритмів як терапевтичних агентів змінює соціальні взаємини в медицині. Лікар перестає бути єдиним джерелом терапевтичного рішення, а пацієнт тільки пасивним отримувачем лікування. З'являється нова динаміка, де відповідальність за прийняття рішень розподіляється між людиною та алгоритмом. Це потребує перегляду стандартів етики, медичної освіти та професійної відповідальності.

Отже, належне регулювання етичних та соціальних аспектів алгоритмічної фармакології є обов'язковою умовою безпечного й ефективного застосування терапевтичних агентів.

Молекулярна та інформаційна парадигми створення лікувального агента. Процес створення інноваційного лікарського засобу є одним із найбільш формалізованих і структурованих у сучасній науці. Він включає послідовний ланцюг етапів від фундаментального відкриття терапевтичної мішені до постмаркетингового нагляду [21]. Однак поява алгоритмічної терапії, яку в міжнародній практиці часто розглядають як форму Digital Therapeu-

tics, ставить питання про те, які з цих етапів зберігають свою актуальність, а які втрачають сенс або набувають нової форми.

Незважаючи на принципову відмінність між молекулою і алгоритмом, початковий етап розроблення залишається спільним. Будь-яка терапія починається з визначення механізму патології і потенційної точки втручання. У фармакології це може бути рецептор, фермент або сигнальний шлях. В алгоритмічній терапії мішенню стає когнітивний або поведінковий процес, наприклад патерни мислення при депресії чи поведінкові фактори контролю глікемії. Цей етап є критично важливим, оскільки саме він визначає логіку майбутнього втручання. Алгоритм, подібно до молекули, має бути спрямованим на конкретний механізм захворювання, навіть якщо цей механізм реалізується через інформаційні або поведінкові процеси.

Найбільш радикальні відмінності виникають на доклінічному етапі. У фармакології саме тут проводять дослідження *in vitro*, експерименти на клітинних культурах, токсикологічні тести, дослідження на тваринах. Їхня мета — визначити біологічний механізм та оцінити безпечність дії речовини [21].

Для алгоритму ці процедури втрачають сенс, оскільки програмний код не взаємодіє з клітинними структурами і не має токсичності у фармакологічному значенні. Тому класичні токсикологічні та фармакокінетичні дослідження стають неможливими, але це не означає відсутність ризиків, оскільки можуть виникати когнітивні, поведінкові або системні небезпеки. Проте ці ризики потребують іншого методу оцінки, ніж біомедичні експерименти.

Клінічні випробування залишаються центральним етапом і для алгоритмічної терапії. Регулятори, зокрема FDA, дедалі частіше вимагають доказів ефективності за результатами рандомізованих контрольованих досліджень. Водночас структура цих досліджень змінюється: якщо у фармакології фаза I спрямована на визначення безпечної дози препарату, то в алгоритмічній терапії вона часто зосереджується на безпечності використання, зрозумі-

лості інтерфейсу та взаємодії користувача із системою. Фази II і III, навпаки, залишаються концептуально близькими до фармакологічної моделі. Вони оцінюють клінічну ефективність і порівнюють алгоритмічну терапію зі стандартом лікування.

Останній етап (моніторинг після виходу на ринок) набуває особливої ваги. У фармакології склад препарату після реєстрації практично не змінюється, а в алгоритму, навпаки, структура може регулярно оновлюватися. Тому регулятори, зокрема International Medical Device Regulators Forum, розробляють підходи до контролю життєвого циклу програмного забезпечення. Кожна нова версія може впливати на клінічний результат, що потребує постійної оцінки системи. Отже, якщо класична фармакологія має лінійну модель розроблення, то алгоритмічна терапія функціонує на основі циклічної моделі, де етапи перевірки повторюються після кожної значної модифікації.

Перспективи розвитку алгоритмічної фармакології. Алгоритмічна фармакологія як нова парадигма медицини перебуває зараз на початкових етапах розвитку, проте її потенціал для трансформації терапевтичної практики є величезним. Перспективи цього напрямку включають інтеграцію з клінічною медициною, стандартизацію алгоритмічних терапій та започаткування нових напрямів досліджень.

Однією з ключових перспектив є тісна інтеграція алгоритмічних терапій у клінічну практику, де алгоритм виступає рівноправним «учасником» лікування. Таке впровадження

дозволяє поєднувати людський клінічний досвід зі здатністю алгоритмів швидко обробляти великі масиви даних, що підвищує точність терапевтичних рішень та ефективність лікування. Для того щоб алгоритмічна фармакологія набула широкого клінічного застосування, необхідно вдосконалити універсальні критерії «алгоритмічної дози», способи оцінки терапевтичного ефекту та безпеки, а також протоколи навчання і перевірки моделей.

Майбутні дослідження в алгоритмічній фармакології матимуть кілька пріоритетних напрямів:

- поглиблення персоналізації терапії, що дозволить алгоритмам враховувати геномні, метаболічні та поведінкові профілі пацієнтів для максимально точного підбору алгоритмічної «дози»;
- посилення взаємосумісності систем завдяки розвитку стандартів для інтеграції алгоритмів у різні електронні медичні системи та пристрої;
- активізація інтелектуальних адаптивних систем, які дозволять алгоритмам навчатися на даних конкретного пацієнта та динамічно модифікувати терапію у реальному часі;
- розширення етичних та соціальних досліджень з оцінки впливу алгоритмічних терапій на лікарську практику, соціальну справедливість та довіру пацієнтів.

Інтеграція, стандартизація та наукові дослідження разом забезпечать не лише ефективність, а й безпечність та прийнятність цього нового класу терапевтичних агентів.

REFERENCES

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Bin Rashid A., Kausik A.K. AI revolutionizing industries worldwide: A comprehensive overview of its diverse applications. *Hybrid Advances*. 2024. 7: 100277. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100277>
2. Ghafur S., van Dael J., Leis M., Darzi A., Sheikh A. Public perceptions on data sharing: key insights from the UK and the USA. *Lancet Digital Health*. 2020. 2(9): 444—446. [https://doi.org/10.1016/S2589-7500\(20\)30161-8](https://doi.org/10.1016/S2589-7500(20)30161-8)
3. Davenport T., Kalakota R. The potential for artificial intelligence in healthcare. *Future Healthcare Journal*. 2019. 6(2): 94—98. <https://doi.org/10.7861/futurehosp.6-2-9>
4. Vial A., Stirling D., Field M., Ros M., Ritz C., Carolan M., Holloway L., Miller A.A. The role of deep learning and radiomic feature extraction in cancer-specific predictive modelling: a review. *Translational Cancer Research*. 2018. 7(3): 803—816. <https://doi.org/10.21037/tcr.2018.05.02>
5. Gaviria-Valencia S., Murphy S.P., Kaggal V.C., McBane II R.D., Rooke T.W., Chaudhry R., Alzate-Aguirre M., Arruda-Olson A.M. Near real-time natural language processing for the extraction of abdominal aortic aneurysm diagnoses from radiology reports: algorithm development and validation study. *JMIR Medical Informatics*. 2023. 11: e40964. <https://doi.org/10.2196/40964>
6. Uri A. *An Introduction to Systems Biology*. Chapman and Hall/CRC, 2006. <https://doi.org/10.1201/9781420011432>
7. Shortliffe E., Cimino J. *Biomedical Informatics: Computer Applications in Health Care and Biomedicine*. Springer, 2021. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4474-8>
8. Golovenko M.Ya., Larionov V.B. From Pharmacological Informatics to Informational Pharmacology: A Conceptual Shift in Therapeutics. In: *International Multidisciplinary Conference on Innovation, Technology and Sustainability*. Futurity Research Publishing, 2026. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18719816>
9. Golovenko M.Ya. *Fiziko-khimicheskaya farmakologiya* [Physicochemical Pharmacology]. Odessa, 2004 [in Russian]. [Головенко Н.Я. *Фізико-хімічеська фармакологія*. Одеса: Астропринт, 2004.]
10. Topol E. *Deep Medicine: How Artificial Intelligence Can Make Healthcare Human Again*. Basic Books, 2019.
11. Torous J., Bucci S., Bell I.H., Kessing L.V., Faurholt-Jepsen M., Whelan P., Carvalho A.F., Keshavan M., Linardon J., Firth J. The growing field of digital psychiatry: current evidence and the future of apps, social media, chatbots, and virtual reality. *World Psychiatry*. 2021. 20(3): 318—335. <https://doi.org/10.1002/wps.20883>
12. Luxton D.D. *Artificial Intelligence in Behavioral and Mental Health Care*. Academic Press, 2016. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-12824-3>
13. Collins F.S., Varmus H. A new initiative on precision medicine. *New England Journal of Medicine*. 2015. 372: 793—795. <https://doi.org/10.1056/NEJMp1500523>
14. Esteva A., Robicquet A., Ramsundar B. et al. A guide to deep learning in healthcare. *Nature Medicine*. 2019. 25: 24—29. <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0316-z>
15. *Artificial Intelligence / Machine Learning-Based Software as a Medical Device Action Plan*. FDA, 2021. <https://www.fda.gov/media/145022/download>
16. *Software as a Medical Device: Possible Framework for Risk Categorization and Corresponding Considerations*. IMDRF, 2014. <https://www.gmp-compliance.org/files/guidemgr/imdrf-tech-140918-samd-framework-risk-categorization-141013.pdf>
17. Mohr D.C., Weingardt K.R., Reddy M., Schueller S.M. Three Problems with Current Digital Mental Health Research and Three Things We Can Do About Them. *Psychiatric Services*. 2017. 68(5): 427—429. <https://doi.org/10.1176/appi.ps.20160054>
18. Torous J., Jän Myrick K., Rauseo-Ricupero N., Firth J. Digital mental health and COVID-19: using technology today to accelerate the curve on access and quality tomorrow. *JMIR Ment. Health*. 2020. 7(3): e1884818. <https://doi.org/10.2196/18848>
19. Golovenko M., Larionov V. Information window as a methodology for assessing the safety and effectiveness balance of artificial intelligence medical systems. *Artificial Intelligence*. 2025. 30(4): 10—23. <https://doi.org/10.15407/jai2025.04.010>
[Головенко М.Я., Ларіонов В.Б. Інформаційне вікно як методологія оцінки співвідношення безпеки та ефективності медичних систем штучного інтелекту. *Штучний інтелект*. 2025. № 4. С. 10—23.]
20. Golovenko M.Ya., Larionov V.B. Methodological foundations for ensuring the safety and clinical effectiveness of artificial intelligence systems in healthcare. In: *Public Health System in Ukraine and EU Countries: Realities, Transformation, Development Vectors, Perspectives*. Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2025. P. 447—459. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-637-9-19>

21. Golovenko M.Ya. “Philosophy” of Pharmaceutical Innovations. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2012. (3): 59—66. <https://doi.org/10.15407/visn2012.03.059>
[Головенко М.Я. «Філософія» фармацевтичних інновацій. *Вісник НАН України*. 2012. № 3. С. 59—66.]

Mykola Ya. Golovenko

O.V. Bogatsky Physico-Chemical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Odesa, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1485-128X>

ALGORITHMIC PHARMACOLOGY: FROM PHARMACOTHERAPY TO THERAPY BY ALGORITHMS

This paper proposes the concept of algorithmic pharmacology as a novel interdisciplinary field of medical science that studies algorithms and artificial intelligence systems as potential informational therapeutic agents. The evolution of therapeutic paradigms — from surgery and pharmacotherapy to algorithm-based therapy — is analyzed, and the transition of medicine toward an informational level of therapeutic intervention is theoretically substantiated. The prerequisites for the emergence of algorithmic pharmacology are examined, including the development of medical artificial intelligence, digital therapeutics, precision medicine, and big medical data. A structural model of the discipline is proposed, encompassing theoretical, experimental, and clinical levels. The possibility of transferring classical pharmacological categories (dose, pharmacodynamics, pharmacokinetics, toxicity) to algorithmic systems is justified based on the principle of structural isomorphism. Special attention is given to the classification of medical algorithms, the concept of a “pharmacopoeia of algorithms,” regulatory frameworks, algorithmic safety, ethical considerations, and future prospects for clinical integration. A tiered model of algorithmic autonomy is introduced, outlining regulatory requirements for therapeutic AI systems. Algorithmic pharmacology is presented as a conceptual foundation for the transition from material pharmacotherapy to informational therapy by algorithms, opening new horizons for the future development of medicine.

Keywords: algorithmic pharmacology; algorithmic therapy; artificial intelligence in medicine; digital therapeutics; algorithmodynamics; algorithmokinetics; algorithmic dose; AI regulatory framework; precision medicine; informational medicine.

Cite this article: Golovenko M.Ya. Algorithmic pharmacology: from pharmacotherapy to therapy by algorithms. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2026. (4): 15—27. <https://doi.org/10.15407/visn2026.04.015>