

**KAPITEL 5 / CHAPTER 5 ⁵****PROBLEMS OF INTEGRATING OPTIMIZATION METHODS INTO THE METHODOLOGY OF SCIENTIFIC RESEARCH****DOI: 10.30890/2709-2313.2025-42-03-037****Вступ**

Сучасна наукова діяльність характеризується зростаючою складністю дослідницьких завдань, значним обсягом даних та необхідністю інтеграції знань із різних галузей науки. Ключового значення набувають оптимізаційні методи як інструмент підвищення ефективності, точності та прогнозованості наукових досліджень. Вони забезпечують системний підхід до вибору найкращих рішень у складних багатofакторних проблемах, дають змогу формалізувати процеси і оптимізувати витрату ресурсів.

Попри очевидні переваги, впровадження оптимізаційних методів у практику наукових досліджень залишається обмеженим. Ряд факторів стримує їх широке застосування: низький рівень математичної підготовки дослідників, недостатня якість та неповнота вихідних даних, складність сучасного програмного забезпечення, міждисциплінарний характер більшості сучасних задач, а також обмеженість обчислювальних, часових та інтелектуальних ресурсів. Кожна з цих проблем має глибокий системний характер і потребує комплексного підходу для подолання.

Водночас розвиток обчислювальної техніки, програмних платформ, хмарних сервісів та методів машинного навчання створює нові можливості для інтеграції оптимізаційних підходів у наукову практику. Застосування таких методів здатне забезпечити підвищення якості наукових результатів, прискорення обробки експериментальних даних та формування обґрунтованих стратегій розвитку дослідницьких напрямів.

У межах системного аналізу проблем, що стримують застосування оптимізаційних методів у наукових дослідженнях, буде розглянуто п'ять

⁵*Authors: Makhynko Valerii Mykolaiovych, Makhynko Liudmyla Vasylivna*

Number of characters: 39530

Author's sheets: 0,99



ключових груп перешкод, оцінено їхній вплив на науковий процес, а також окреслено шляхи подолання цих бар'єрів із урахуванням сучасних технологічних, освітніх та організаційних можливостей. Це дасть змогу сформулювати науково обґрунтовану концепцію інтеграції оптимізаційних методів у різні галузі знань, підвищуючи ефективність і якість наукових досліджень.

5.1 Роль методів оптимізації у методології наукових досліджень

Оптимізаційні методи посідають ключове місце у сучасній науковій діяльності, забезпечуючи раціональний вибір рішень за наявності численних альтернатив, обмежень і суперечливих критеріїв. Сутність оптимізації полягає у знаходженні найкращого варіанта із множини можливих відповідно до певного критерію ефективності, що робить ці методи універсальним інструментом для дослідників у різних галузях знань — від технічних і природничих наук до економіки, біомедицини та соціології.

У наукових дослідженнях оптимізація дає змогу не лише мінімізувати затрати часу, матеріалів чи енергії, а й забезпечити більш глибоке розуміння закономірностей функціонування об'єкта дослідження. Математичні моделі, побудовані з використанням оптимізаційних підходів, сприяють кількісному аналізу складних систем і процесів, що мають стохастичний або нелінійний характер. Саме через оптимізацію науковці формалізують цілі дослідження, уточнюють параметри моделей і визначають найдоцільніші напрями експериментальної перевірки гіпотез.

Загальнонаукове значення оптимізаційних методів полягає в тому, що вони уможливають перехід від описового рівня пізнання до аналітичного, а від нього — до прогностичного. Сучасна наука дедалі частіше спирається на моделювання складних об'єктів і процесів, де ручне оцінювання ефективності практично неможливе. Використання алгоритмів лінійного, нелінійного, стохастичного чи багатокритеріального програмування істотно підвищує



точність розрахунків, достовірність прогнозів і стабільність результатів. Це, у свою чергу, сприяє формуванню нового рівня наукової обґрунтованості, коли рішення базується не на інтуїції дослідника, а на об'єктивних даних [1].

Інтеграція оптимізаційних методів у наукові дослідження забезпечить системність і структурованість мислення дослідника. Оптимізація змушує чітко формулювати цілі, встановлювати обмеження, обирати вагомість критеріїв і оцінювати компроміси між ними. Такий підхід зменшує суб'єктивність у прийнятті рішень і сприяє стандартизації наукових процедур. Водночас він підвищує здатність дослідника бачити взаємозв'язки між елементами системи, що є необхідною умовою для міждисциплінарних досліджень.

Особливої ваги оптимізаційні методи набули у зв'язку з розвитком цифрових технологій. Комп'ютерне моделювання, машинне навчання, штучний інтелект і методи великих даних ґрунтуються на оптимізаційних алгоритмах. У природничих науках ці методи використовують для аналізу генетичних даних, оптимізації умов перебігу складних хімічних і біохімічних реакцій, прогнозування кліматичних процесів. У технічних науках оптимізаційні підходи формують основу системного проєктування, розрахунку конструкцій і технологічних режимів. В економічних дослідженнях вони слугують інструментом для моделювання ринкових процесів, оцінювання ризиків і розподілу ресурсів.

Наукова цінність оптимізаційних методів полягає також у культивуванні аналітичної культури мислення. Робота з оптимізаційними моделями вимагає від дослідника здатності мислити абстрактно, виокремлювати суттєві параметри й водночас усвідомлювати межі застосовності обраних моделей. Такий підхід стимулює критичне мислення, точність формулювань і логічну послідовність у побудові гіпотез. Крім того, оптимізація дає змогу оцінювати не лише кінцеві результати, а й ефективність самого наукового процесу, що важливо для планування досліджень, керування ресурсами лабораторій та оцінювання продуктивності наукових колективів.

Інтеграція оптимізаційних методів у наукові дослідження відкриває нові



перспективи для формування адаптивних, самонавчальних систем, здатних самостійно коригувати параметри моделі відповідно до змін середовища. У майбутньому це сприятиме розвитку автономних дослідницьких платформ, де вибір експериментальних умов або напрямів дослідження здійснюватиметься на основі критеріїв оптимальності. Такий підхід здатен суттєво скоротити часові витрати на пошук ефективних рішень і підвищити ймовірність отримання інноваційних результатів.

Попри очевидні переваги, інтеграція оптимізаційних методів у наукові дослідження має низку проблем. Найперше — складність побудови адекватних математичних моделей для систем із високим рівнем невизначеності або слабо формалізованими зв'язками. Часто науковці стикаються з труднощами у виборі критеріїв оптимальності, що можуть бути суперечливими або нечітко визначеними. Крім того, реальні дані нерідко містять похибки, що впливають на коректність оптимізаційних результатів. Проблемою залишається і те, що багато оптимізаційних алгоритмів вимагають значних обчислювальних ресурсів, що ускладнює їхнє застосування у великих системах або під час оброблення масивів даних.

Перспективи розвитку оптимізаційних методів у науці пов'язані з інтеграцією штучного інтелекту, нечіткої логіки та евристичних алгоритмів, які забезпечують гнучкість і здатність працювати з неповними даними. Нові покоління алгоритмів, що поєднують елементи градієнтних методів, еволюційних стратегій і стохастичного моделювання, відкривають можливості для розв'язання завдань, які раніше вважалися нерозв'язними. Особливо актуальним є розвиток багатокритеріальної оптимізації, що враховує одночасно технічні, економічні, екологічні та соціальні аспекти наукових і технологічних проєктів.

Таким чином, оптимізаційні методи стають невід'ємною складовою сучасної наукової методології. Вони забезпечують логічну чіткість, ефективність і прогнозованість наукового пошуку, формують основу для створення інтелектуальних систем аналізу та управління знаннями. В умовах



інформаційного суспільства саме здатність дослідника застосовувати оптимізаційні підходи визначає рівень його наукової компетентності та конкурентоспроможності у світовому науковому просторі.

Впровадження оптимізаційних методів у наукові дослідження відкриває нові горизонти для систематизації процесу прийняття рішень, підвищення точності моделювання та ефективного використання наявних ресурсів. Використання цих методів дає змогу формалізувати складні наукові проблеми, визначати оптимальні параметри експериментів та прогнозувати результати на основі комплексного аналізу даних. Завдяки цьому дослідники можуть не лише скоротити час на пошук рішень, а й підвищити обґрунтованість висновків, інтегруючи кількісні та якісні показники в єдину систему оцінки ефективності. Такий підхід особливо цінний у міждисциплінарних дослідженнях, де одночасно взаємодіють численні фактори, і традиційні методи аналізу часто виявляються недостатньо ефективними.

Разом із тим, незважаючи на очевидні переваги оптимізаційних методів, їхнє впровадження у наукову практику супроводжується рядом системних проблем. Дослідники часто стикаються з бар'єрами, що обмежують їхню здатність повною мірою застосовувати сучасні методики, включаючи складність математичного апарату, низьку якість даних, необхідність опанування спеціалізованого програмного забезпечення та координації між різними дисциплінами. Крім того, обмеженість обчислювальних, часових та інтелектуальних ресурсів створює додаткові перепони, які змушують науковців шукати компромісні рішення або відмовлятися від застосування оптимізаційних підходів у повному обсязі. Такий контраст між потенційними вигодами та реальними обмеженнями підкреслює необхідність системного аналізу проблем та пошуку ефективних стратегій інтеграції оптимізації у наукову діяльність.

5.2 Проблема перша: низький рівень математичної підготовки дослідника

Однією з головних причин обмеженого використання оптимізаційних



методів у науковій діяльності залишається недостатній рівень математичної підготовки дослідників. Цей чинник має системний характер і зумовлений як історичними особливостями освітніх програм, так і психологічною установкою частини науковців на описовий, а не формалізований стиль мислення. Водночас ефективне застосування оптимізаційних методів потребує не лише загального розуміння математичних принципів, а й глибокого володіння інструментарієм аналізу функцій, теорії екстремумів, методів чисельної оптимізації, а також основ теорії ймовірностей і статистики.

У більшості галузей знань — від біології до соціології — дослідники зосереджуються на предметному змісті проблеми, тоді як математичний апарат розглядають лише як допоміжний засіб. Це призводить до того, що формулювання задачі оптимізації часто виявляється некоректним: неправильно обрано змінні, не визначено обмеження або критерій цільової функції. Унаслідок цього навіть найточніші обчислення не мають змістовної цінності, адже математична модель не відображає сутності досліджуваного процесу.

Нестача математичної підготовки проявляється і в проблемах інтерпретації результатів оптимізації. Дослідники нерідко сприймають числові значення розв'язку як кінцеву істину, не аналізуючи чутливість моделі до зміни параметрів, стійкість алгоритму чи наявність локальних екстремумів. Без розуміння цих аспектів результати можуть бути випадковими або суттєво залежними від обраного методу, що знижує достовірність наукових висновків.

Крім того, багато оптимізаційних підходів базуються на складних поняттях, які для науковців, що не мають системної підготовки з вищої математики, можуть залишатися абстрактними. Це обмежує можливість самостійного створення або модифікації оптимізаційних алгоритмів під специфічні завдання, а також ускладнює критичне сприйняття готових програмних пакетів, які часто використовуються без глибокого розуміння принципів їх роботи.

Ситуація ускладнюється ще й тим, що сучасна наука потребує оперування багатовимірними просторами даних і складними об'єктами моделювання. Відсутність таких знань зумовлює відмову багатьох дослідників від застосування



оптимізаційних засобів на користь емпіричних спостережень чи пробно-помилкових підходів.

Важливо зазначити, що проблема низького рівня математичної підготовки має не лише індивідуальний, а й системний вимір. У навчальних програмах більшості магістерських і аспірантських курсів природничо-технічного спрямування математичні дисципліни часто скорочені або мають фрагментарний характер. Натомість увага приділяється прикладним аспектам без достатнього розуміння теоретичних основ [2]. Такий підхід заважає формуванню у молодих науковців глибоких знань про потрібні аналітичні інструменти, що унеможливорює ефективне застосування оптимізаційних методів на етапі планування дослідження чи оброблення експериментальних даних.

Наслідком цього є те, що оптимізаційні методи сприймаються як «чорна скринька», тобто набір алгоритмів, результат яких не піддається глибокому аналізу. Як результат — дослідник не може оцінити обґрунтованість одержаного рішення, що суперечить базовим принципам наукової достовірності. Крім того, обмежена математична компетентність знижує здатність дослідника до критичного оцінювання моделей, розроблених іншими науковцями, і ускладнює міждисциплінарну комунікацію, де аналітична спроможність має вирішальне значення.

Поступове подолання цієї проблеми можливе лише через системну зміну освітньої парадигми. Йдеться про необхідність інтеграції прикладної математики, теорії оптимізації та статистичного аналізу у всі програми підготовки дослідників, незалежно від галузі. Також важливо формувати у науковців культуру математичного мислення, що передбачає вміння абстрагуватися від предметного змісту, узагальнювати закономірності та бачити структуру проблеми через систему формальних зв'язків. Підвищення математичної грамотності дослідників має стати пріоритетом у стратегіях розвитку наукової освіти, адже без цього оптимізаційні методи залишатимуться привілеєм вузького кола спеціалістів, а не універсальним інструментом наукового пізнання.



5.3 Проблема друга: недостатня якість і повнота початкових даних

Однією з найпоширеніших причин, що ускладнюють упровадження оптимізаційних методів у наукову практику, є низька якість і неповнота вихідних даних. Будь-який процес оптимізації ґрунтується на формалізованому описі досліджуваного об'єкта, тобто на наборі параметрів, величин і залежностей, які мають відображати реальні властивості системи. Якщо ці дані є спотвореними, неповними або випадковими, то навіть найскладніші математичні моделі втрачають точність і прогностичну силу. Саме тому проблема якості даних є не лише технічною, а й методологічною, адже вона визначає межі застосовності оптимізаційних підходів у наукових дослідженнях [3].

У більшості емпіричних наук дані формуються в умовах невизначеності, де на результати спостережень впливають численні зовнішні чинники. Наприклад, у біотехнології це коливання параметрів навколишнього середовища, у матеріалознавстві — неоднорідність сировини, у соціології — суб'єктивність відповідей респондентів. Усі ці фактори спричиняють появу шуму, тобто випадкових відхилень, які маскують реальні закономірності. Оптимізаційні алгоритми, особливо детерміновані, чутливі до таких відхилень і можуть видавати результати, що не мають фізичного чи практичного сенсу.

Іншою проблемою є неповнота даних. У багатьох випадках спостереження не охоплюють усіх релевантних змінних, необхідних для побудови адекватної моделі. Відсутність важливих параметрів змушує дослідників застосовувати методи апроксимації або робити спрощувальні припущення, знижуючи реалістичність оптимізаційної моделі. Так, при моделюванні технологічного процесу може бути відомо лише частину показників, тоді як інші (наприклад, мікроструктурні характеристики сировини або приховані втрати енергії) залишаються поза аналізом. За таких умов знайдене «оптимальне» рішення фактично є локальним компромісом у межах неповної інформації [4].

Нерідко дані, отримані з різних джерел, мають різну точність або масштаб. Це створює проблему їх уніфікації, нормування та подальшого використання в



моделі. Наприклад, у міждисциплінарних дослідженнях дані можуть поєднувати результати фізичних вимірювань, економічних розрахунків і статистичних оцінок, кожна з яких має власний рівень похибки. Без ретельної попередньої обробки, зокрема нормалізації, усереднення й перевірки на кореляційну узгодженість, результати оптимізації можуть бути методично хибними.

Крім того, у сучасних дослідженнях поширеною є проблема репрезентативності даних. Часто дослідники працюють із вибірками, які не відображають повної варіації параметрів об'єкта. Це характерно для біологічних експериментів із малими обсягами вибірки або для технічних процесів, де вимірювання виконуються лише в певних режимах роботи системи. За таких умов модель оптимізації не може узагальнювати результати, що призводить до зниження її прогностичної цінності.

Ще один аспект — часові й просторові обмеження даних. Оптимізаційні методи передбачають, що досліджуваний процес має стабільні параметри або підпорядковується відомим закономірностям. Проте в реальності багато систем є динамічними та змінюються з часом. У разі, коли оптимізаційна модель побудована на застарілих або нерелевантних даних, її результати втрачають актуальність і практичну цінність. У природничих і технічних галузях це особливо небезпечно, оскільки навіть невелика зміна умов може спричинити значне відхилення від прогнозованого «оптимуму» [5].

Проблема якості даних також має організаційний вимір. У багатьох наукових установах відсутні стандартизовані процедури збору, зберігання та валідації даних. Це призводить до розбіжностей у форматах, неточностей у метаданих і неможливості повторного використання результатів іншими дослідниками. Для оптимізаційних методів, які ґрунтуються на точних кількісних співвідношеннях, така нестандартизованість створює критичні ризики, оскільки навіть незначна помилка у вихідних даних може призвести до суттєвого спотворення кінцевого рішення.

Складність вирішення згаданих проблем полягає в тому, що підвищення якості даних потребує значних ресурсів — часу, фінансування, технічного



забезпечення та спеціальної підготовки персоналу. Тому в багатьох випадках дослідники змушені працювати з неповними чи умовними даними, знижуючи аналітичний потенціал оптимізаційних методів. Нерідко це стає причиною відмови від використання оптимізації на користь простіших, але менш точних емпіричних підходів.

Для подолання цієї проблеми необхідне впровадження сучасних методів управління даними — Data Quality Management, Data Curation і FAIR-принципів (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable). Такі підходи дають змогу забезпечити структурованість, узгодженість і відтворюваність наукових даних, що є передумовою ефективного застосування оптимізаційних моделей. Крім того, важливо поширювати культуру відповідального ставлення до даних, коли дослідник усвідомлює, що якість інформації безпосередньо визначає достовірність наукових висновків. Лише в цьому випадку оптимізаційні методи зможуть реалізувати свій потенціал як універсальний інструмент підвищення ефективності наукового пізнання [6].

5.4 Проблема третя: складність опанування сучасного програмного забезпечення

Сучасна наукова діяльність дедалі більше залежить від інформаційних технологій, адже майже всі оптимізаційні методи реалізуються у вигляді програмних засобів або обчислювальних платформ. Але вони рідко реалізуються у вигляді простих і інтуїтивно зрозумілих інтерфейсів. Найчастіше вони потребують використання мов програмування (Python, MATLAB, R, Julia) або спеціалізованих бібліотек (SciPy, Pyomo, Gurobi, CPLEX тощо), які вимагають певного рівня технічної грамотності. Для дослідників, що мають гуманітарну або біологічну освіту, робота з такими інструментами видається складною і часто викликає побоювання помилок у кодуванні чи налаштуванні алгоритму. Саме складність опанування такого програмного забезпечення є однією з основних причин, чому багато дослідників уникають використання оптимізаційних



інструментів. Проблема має не лише технічний, а й когнітивно-організаційний характер, адже вимагає від науковця певної програмної культури, навичок роботи з алгоритмами, розуміння структури даних та основ програмування. Унаслідок цього вони або обмежуються ручними розрахунками, або користуються готовими прикладними програмами з фіксованими параметрами, не розуміючи механізмів їхньої роботи [7].

Ще однією проблемою є швидка еволюція програмного середовища. Нові версії бібліотек, оновлення пакетів і зміни в синтаксисі мов програмування вимагають постійного навчання та адаптації. Науковці, особливо старшого покоління, часто не мають часу або мотивації для систематичного опанування нових інструментів. Як наслідок, вони продовжують використовувати застарілі програмні рішення або взагалі відмовляються від оптимізаційних методів через складність технічного впровадження.

Окремою проблемою є інтеграція оптимізаційних модулів у більш загальні системи моделювання чи управління даними. Для побудови комплексної моделі дослідникові необхідно не лише задати функцію цілі й обмеження, а й забезпечити зв'язок із базою даних, модулем візуалізації та системою керування експериментом. Таке завдання потребує навичок розроблення програмного коду, розуміння архітектури програмного забезпечення й уміння працювати з API або середовищами розподілених обчислень. Без належної технічної підготовки така інтеграція стає практично недосяжною. Водночас недостатньою є кількість навчальних ресурсів з цієї теми, зорієнтованих саме на науковців, а не на професійних програмістів. Більшість посібників і документації подаються у формі, що вимагає вже сформованої IT-компетентності. Це створює бар'єр входу для тих дослідників, які не мають попереднього досвіду програмування. Університетські курси часто не охоплюють питань оптимізації у прикладних середовищах, обмежуючись теоретичними аспектами, що не формує практичних навичок користування сучасним програмним забезпеченням.

Ще один складність — різноманітність платформ і відсутність універсальних стандартів. Оптимізаційні методи реалізуються в різних



середовищах, кожне з яких має власну синтаксичну структуру, специфіку інтерфейсу та вимоги до обчислювальних ресурсів. Наприклад, MATLAB традиційно використовується у технічних науках, тоді як Python переважає у сфері машинного навчання, а R — у статистичних дослідженнях. Для дослідника, який прагне міждисциплінарного підходу, необхідність опановувати кілька середовищ одночасно створює суттєве навантаження.

Крім технічної складності, проблема має ще й психологічний вимір. Частина дослідників сприймає програмування як діяльність, що не належить до «чистої науки». Вони схильні вважати, що наукова цінність полягає в ідеях і теоретичних висновках, а не в інструментах їх реалізації. Таке упередження гальмує розвиток цифрової культури науковців і перешкоджає переходу від традиційних методів аналізу до автоматизованих оптимізаційних підходів.

Важливу роль відіграє й організаційний чинник. У багатьох наукових установах відсутні фахівці з наукових обчислень або технічна підтримка для роботи з оптимізаційними пакетами. Дослідники залишаються наодинці з проблемою налаштування програмного середовища, інсталяції бібліотек і усунення технічних помилок. Це знижує продуктивність роботи й формує негативне ставлення до використання програмних засобів у наукових проєктах.

Для подолання вказаних проблем необхідна цілеспрямована інституційна політика щодо підвищення цифрової компетентності науковців. Доцільним є створення навчальних курсів, коротких програм професійного розвитку або лабораторій підтримки, які б забезпечували консультаційну допомогу під час використання оптимізаційного програмного забезпечення. Важливим напрямом є також популяризація відкритих платформ із дружнім інтерфейсом, які поєднують візуальне моделювання з математичною строгістю (наприклад, Wolfram Mathematica, KNIME, Orange, COMSOL Multiphysics). Без цього оптимізаційні технології залишатимуться інструментом вузького кола спеціалістів, тоді як потенціал їх застосування в науці є надзвичайно широким.



5.5 Проблема четверта: необхідність міждисциплінарного підходу

Сучасна наука характеризується дедалі більшою інтеграцією знань із різних галузей. Складні дослідницькі проблеми, пов'язані з технологічними, екологічними чи соціальними викликами, не можуть бути розв'язані в межах лише однієї дисципліни. Оптимізаційні методи, які передбачають формалізацію об'єкта, побудову цільових функцій і системи обмежень, за своєю суттю потребують міждисциплінарного підходу. Однак саме цей чинник нерідко стає перепорою для їх активного застосування в наукових дослідженнях [8].

По-перше, міждисциплінарність потребує спільної мови опису явищ, тоді як оптимізаційні моделі вимагають високого рівня математичної абстракції. Дослідники з біології, соціології чи гуманітарних наук часто оперують якісними категоріями, які важко формалізувати у вигляді параметрів, функцій чи алгоритмів. Унаслідок цього спроба застосувати оптимізаційні методи стикається з проблемою невідповідності між природою об'єкта дослідження і математичним інструментарієм. Зведення складних систем до числових показників нерідко викликає спротив через побоювання спрощення або втрати контексту.

По-друге, оптимізаційні завдання часто охоплюють кілька рівнів системної взаємодії — технічний, економічний, екологічний, соціальний. Для побудови адекватної моделі потрібно залучати фахівців із різних галузей, що ускладнює координацію наукового процесу. Кожен із таких фахівців має власне бачення проблеми, використовує власну термінологію та підходи до аналізу. Об'єднання цих поглядів у єдину оптимізаційну схему вимагає не лише знань, а й комунікативних і організаційних навичок, що виходять за межі традиційної наукової діяльності.

Третім аспектом є відсутність готових методологічних рамок для інтеграції різних типів знань у процес оптимізації. Наприклад, під час моделювання технологічного процесу необхідно поєднати фізико-хімічні закономірності, економічні обмеження та вимоги до якості продукту. У різних дисциплінах



використовуються свої моделі — від аналітичних рівнянь до емпіричних регресій, — і узгодження їх у межах єдиної оптимізаційної задачі часто є методологічно складним. Без розроблення універсальних підходів до багаторівневого моделювання застосування оптимізації залишається фрагментарним.

Крім того, міждисциплінарний характер сучасних досліджень створює труднощі у виборі критеріїв оптимальності. Для інженера головним може бути мінімум енергоспоживання, для економіста — максимум прибутку, для еколога — мінімізація впливу на довкілля, а для технолога — найвища якість. Визначення узагальненої функції мети, яка враховує всі ці аспекти, часто вимагає компромісу, що знижує точність або однозначність результатів. У реальних умовах науковці нерідко відмовляються від оптимізаційного підходу саме через складність побудови таких багатокритеріальних моделей.

Суттєвою проблемою є також розрив між математичними теоретиками та прикладними дослідниками. Оптимізаційні методи розробляються переважно в межах прикладної математики, але їх адаптація до конкретних предметних галузей потребує перекладу формальних моделей мовою прикладних наук. Без ефективної комунікації між представниками різних дисциплін ці методи залишаються або надто загальними, або надмірно спеціалізованими, що знижує їх практичну цінність.

Не менш важливою є проблема підготовки кадрів. У більшості освітніх програм, навіть технічного спрямування, міждисциплінарні компетентності формуються фрагментарно. Науковці, які спеціалізуються у вузьких галузях, часто не мають базових знань, необхідних для розуміння суміжних дисциплін. Як наслідок, під час розв'язання оптимізаційних задач, де потрібно враховувати різні типи залежностей, вони або спрощують модель, або відмовляються від її використання.

Використання міждисциплінарного підходу передбачає також необхідність роботи з різнотипними даними — експериментальними, економічними, соціальними, екологічними. Об'єднання таких даних у єдину базу вимагає їх



нормалізації, узгодження одиниць вимірювання та часових інтервалів. У багатьох випадках ці процедури потребують спеціального програмного забезпечення і знань із галузі інформаційних технологій. Для більшості дослідників це виходить за межі звичного наукового інструментарію, що знову ж таки ускладнює впровадження оптимізаційних методів.

Проблему посилює і те, що міждисциплінарні проєкти часто мають колективний характер і потребують ефективного управління дослідницькою командою. Оптимізаційні моделі, будучи складними з математичного погляду, не завжди є зрозумілими для всіх членів команди, особливо якщо вони належать до різних наукових шкіл. У таких умовах складно забезпечити узгодженість рішень і послідовність інтерпретацій результатів [9].

Вирішення цієї проблеми потребує розвитку нової культури наукової співпраці, де математичні інструменти виступають спільною платформою комунікації між дисциплінами. Необхідним є формування освітніх програм, спрямованих на підготовку дослідників із міждисциплінарним мисленням, здатних поєднувати знання з різних галузей у межах єдиних моделей. Ефективним варіантом є створення спільних дослідницьких центрів, де фахівці з різних сфер спільно працюють над розробленням та адаптацією оптимізаційних методів до прикладних завдань [10].

5.6 Проблема п'ята: обмеженість обчислювальних, часових та інтелектуальних ресурсів

Однією з найменш обговорюваних, проте фундаментальних причин низького рівня застосування оптимізаційних методів у сучасній науковій діяльності є обмеженість ресурсів — не лише обчислювальних, а й часових та інтелектуальних. Оптимізаційні підходи, будучи потужним інструментом для підвищення ефективності досліджень, потребують значних вкладень у підготовку даних, побудову моделей, інтерпретацію результатів та перевірку їхньої достовірності. У реальних умовах наукової роботи, коли дослідники



перебувають під тиском терміновості, адміністративних вимог і фінансових обмежень, ці ресурси часто виявляються недостатніми.

Проблема обчислювальних ресурсів має кілька аспектів. Оптимізаційні задачі середнього та високого рівня складності — особливо нелінійні, стохастичні чи багатокритеріальні — вимагають значних обчислювальних потужностей. Навіть за наявності сучасних персональних комп'ютерів, ресурси яких формально є високими, тривалість розв'язання таких задач може сягати годин або й діб, особливо якщо йдеться про симуляційні моделі, що охоплюють великі масиви даних. Не всі наукові установи мають доступ до високопродуктивних обчислювальних систем або хмарних сервісів, придатних для проведення обчислень великого масштабу. Відсутність стабільного технічного забезпечення часто змушує дослідників обмежувати розмір моделі або застосовувати спрощені підходи, які знижують точність результатів.

Не менш вагомим є чинник часу. Розроблення оптимізаційної моделі — це не лише написання алгоритму, а передусім глибоке аналітичне осмислення предметної області, формалізація процесів, підбір адекватних критеріїв і обмежень. Кожен із цих етапів вимагає значного часу на перевірку, корекцію та тестування. У сучасних умовах, коли науковці вимушені поєднувати дослідницьку, викладацьку й адміністративну діяльність, часу на опрацювання оптимізаційних процедур об'єктивно бракує. Через це навіть фахівці, які усвідомлюють переваги оптимізаційних методів, віддають перевагу більш швидким, хоч і менш точним, аналітичним або емпіричним підходам.

До часових втрат додається необхідність тривалого навчання для опанування відповідних інструментів. Складність сучасних оптимізаційних пакетів і програмних бібліотек потребує часу не лише на технічне освоєння, а й на розвиток інтуїції в роботі з моделями. Вміння правильно інтерпретувати результати, оцінювати стабільність алгоритму та виявляти потенційні помилки в налаштуванні параметрів — це результат досвіду, що формується роками. У звичайних умовах наукової діяльності, орієнтованої на публікаційну ефективність, такий інвестиційний горизонт є занадто довгим, і дослідники часто



не мають змоги його реалізувати.

Інтелектуальний аспект обмежень має ще глибший зміст. Оптимізаційне мислення потребує високого рівня когнітивної абстракції, системного бачення і здатності поєднувати формальну логіку з емпіричним досвідом. Такі компетентності не завжди властиві навіть висококваліфікованим ученим, які спеціалізуються у вузьких предметних сферах. Побудова оптимізаційної моделі вимагає розуміння як природи явища, так і математики процесів, що його описують. Для цього необхідна не просто математична грамотність, а здатність до багаторівневого мислення — уміння одночасно аналізувати взаємодію параметрів, оцінювати компроміси між критеріями та прогнозувати поведінку системи за різних умов. Такі інтелектуальні навантаження часто виходять за межі звичного наукового процесу і потребують спеціального інтелектуального середовища, якого бракує в багатьох академічних установах.

Важливим є також фактор ментального виснаження, який супроводжує роботу з великими обчислювальними системами. Періодичні технічні помилки, повільна конвергенція алгоритмів, потреба у численних перевірках і модифікаціях моделі формують додатковий когнітивний тиск. У таких умовах дослідник нерідко ухвалює рішення про спрощення задачі або відмову від оптимізаційного підходу. З психологічного погляду це можна трактувати як прояв адаптивної раціональності — прагнення мінімізувати зусилля за наявних обмежених ресурсів. У разі відсутності належної комунікації та підтримки з боку колег інтелектуальне навантаження концентрується на одній людині, що ще більше ускладнює впровадження навіть найкращих методів.

Сукупність перелічених чинників посилюється організаційними бар'єрами. Оптимізаційні дослідження часто вимагають тривалих обчислень, що не вкладаються у часові рамки типових грантових проєктів або звітних періодів. Фінансові структури, орієнтовані на швидкі результати, рідко підтримують проєкти з високою часткою обчислювальної чи методологічної складності. Це призводить до ситуації, коли навіть за наявності інтелектуального потенціалу та наукової мотивації дослідники не мають можливості реалізувати оптимізаційні



підходи у своїх роботах.

Подолання цієї системної проблеми можливе лише через створення ресурсно підтримуваного середовища наукової діяльності. Йдеться не лише про технічне оснащення, а й про організаційні умови, які враховують реальні потреби дослідників: гнучке планування часу, доступ до хмарних обчислень, підготовку фахівців із наукових обчислень і розроблення міждисциплінарних команд. Необхідним є також переосмислення академічних критеріїв оцінювання, у яких слід враховувати складність і тривалість аналітичних робіт, а не лише кількість публікацій. Лише за умов стратегічного перерозподілу ресурсів, підвищення когнітивної спроможності дослідників і розвитку інфраструктури наукових обчислень можна очікувати суттєвого розширення застосування оптимізаційних підходів у різних галузях знань.

Висновки

Аналіз проблем, що стримують інтеграцію оптимізаційних методів у наукові дослідження, свідчить про їх комплексний характер і взаємопов'язаність. Низький рівень математичної підготовки дослідників обмежує здатність формалізувати задачі, будувати коректні моделі та критично інтерпретувати результати оптимізації. Недостатня якість і неповнота вихідних даних знижують точність одержаних моделей, ускладнюють узагальнення результатів і формують ризик методологічної похибки. Складність сучасного програмного забезпечення та необхідність опанування мов програмування і бібліотек створюють технічні та когнітивні бар'єри, що роблять оптимізаційні підходи менш доступними для широкого кола науковців. Міждисциплінарність сучасних досліджень ускладнює інтеграцію різних типів знань у єдину модель оптимізації, вимагає координації фахівців із різних галузей та формування спільної методологічної мови. Нарешті, обмеженість обчислювальних, часових і інтелектуальних ресурсів створює додаткові перешкоди, які не дозволяють повною мірою реалізувати потенціал оптимізаційних методів навіть за наявності



компетентності та мотивації дослідників.

Водночас сучасні обчислювальні платформи, хмарні сервіси, розвиток відкритих програмних середовищ і міждисциплінарних дослідницьких центрів створюють умови для поширення оптимізаційного мислення у різних галузях. Розвиток освітніх програм, спрямованих на підвищення математичної, програмної та міждисциплінарної компетентності науковців, а також формування культури управління якістю даних і ресурсами дозволяє поступово подолати згадані бар'єри.

Таким чином, інтеграція оптимізаційних методів у наукові дослідження потребує системного підходу, що поєднує розвиток компетентності дослідників, модернізацію освітніх програм, підвищення якості даних, доступ до обчислювальної інфраструктури та ефективну міждисциплінарну координацію. За умови реалізації таких заходів оптимізаційні методи можуть стати універсальним інструментом підвищення точності, ефективності та прогностичної спроможності сучасної науки, відкриваючи нові можливості для формалізованого та обґрунтованого прийняття рішень у дослідницьких проєктах різної складності.