

Цехмістренко Світлана, Бітюцький Володимир, Ластовська Ірина. Розділ XV. Інтеграція штучного інтелекту в хіміко-біотехнологічні дослідження. Штучний інтелект у науці : монографія / [авт. колектив]; за ред. Яцишина Андрія та Яцишин Анни. – Київ: ФОП Ямчинський О.В., 2025. – С. 198-211. ISBN 978-617-8830-09-0

РОЗДІЛ XV. ІНТЕГРАЦІЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ХІМІКО-БІОТЕХНОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

DOI

Цехмістренко Світлана¹[0000-0003-0509-4627], Бітюцький Володимир¹[0000-0002-2699-3974],
Ластовська Ірина¹[0000-0003-0763-8528]

¹Білоцерківський національний аграрний університет, Біла Церква, Україна

Svetlana.tsehmistrenko@gmail.com

Анотація. У роботі досліджує роль штучного інтелекту (ШІ) у хімічних та біотехнологічних дослідженнях, його застосування в аграрному секторі та освіті. Використання алгоритмів машинного навчання дозволяє оптимізувати синтетичні шляхи, моделювати біохімічні реакції та прогнозувати властивості нових сполук. У біотехнології ШІ сприяє аналізу генетичних даних, персоналізованій медицині, ферментаційним процесам і створенню біорозкладних матеріалів. В агротехнологіях інтелектуальні системи забезпечують прецизійне землеробство, моніторинг стану ґрунтів, прогнозування врожайності та здоров'я тварин. Освітня сфера отримує переваги від адаптивних навчальних платформ, віртуальних лабораторій і персоналізованого навчання. Інтеграція ШІ у науку, виробництво та освіту є ключовою для технологічного розвитку та післявоєнного відновлення України. Запровадження інтелектуальних систем підвищує ефективність досліджень, сприяє раціональному використанню ресурсів і вдосконаленню навчального процесу.

Ключові слова. біотехнологія, хімічні дослідження, екологічна безпека, моделювання біохімічних процесів, персоналізована медицина, ферментаційні процеси.

INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE INTO CHEMICAL AND BIOTECHNOLOGICAL RESEARCH

Tsekhmistrenko Svitlana, Bityutsky Volodymyr, Lastovska Iryna

Abstract. The paper investigates the role of artificial intelligence (AI) in chemical and biotechnological research, its application in the agricultural sector and education. The use of machine learning algorithms allows optimising synthetic pathways, modelling biochemical reactions, and predicting the properties of new compounds. In biotechnology, AI facilitates the analysis of genetic data, personalised medicine, fermentation processes, and the creation of biodegradable materials. In agriculture, intelligent systems enable precision farming, soil monitoring, crop yield and animal health forecasting. The education sector is benefiting from adaptive learning platforms, virtual laboratories and personalised learning. Integrating AI into science, production, and education is key to Ukraine's technological development and post-war recovery. The introduction of intelligent systems increases the efficiency of research, promotes the rational use of resources and improves the educational process.

Keywords. biotechnology, chemical research, environmental safety, agrotechnology, modelling of biochemical processes, personalised medicine, fermentation processes.

Вступ. Штучний інтелект (ШІ) докорінно змінює наукову сферу, відкриваючи нові горизонти для досліджень, аналізу даних та освітнього процесу. Його впровадження сприяє автоматизації рутинних завдань, підвищенню точності аналізу та розширенню можливостей науковців. Впровадження ШІ відкриває нові можливості для міждисциплінарних досліджень, прискорюючи науковий прогрес та створюючи передумови для нових відкриттів. Загалом, штучний інтелект є потужним інструментом, який не лише змінює сучасну науку, а й визначає її майбутнє, роблячи дослідження швидшими, точнішими та доступнішими [9].

В Україні, особливо в умовах війни та необхідності післявоєнного відновлення економіки, впровадження ШІ у хімічну та біотехнологічну галузі є ключовим чинником модернізації промислового виробництва та освітньої системи. Зокрема, його застосування сприятиме оптимізації виробничих

процесів, створенню інноваційних матеріалів та біопрепаратів, а також вдосконаленню підготовки кадрів для науково-технологічного сектору.

Сучасні тенденції демонструють, що штучний інтелект (ШІ) стає критично необхідним інструментом для аналізу великих масивів даних, моделювання складних біохімічних процесів та автоматизації експериментів, що дає змогу прискорити наукові відкриття та підвищити ефективність виробництва.

Серед актуальних викликів сьогодення – глобальна продовольча безпека, зміни клімату та необхідність екологічно сталого ведення господарства. У цих умовах застосування ШІ в аграрних університетах набуває особливого значення, оскільки дозволяє підготувати нове покоління фахівців, які володітимуть навичками аналізу даних, управління біотехнологічними процесами та використання передових цифрових технологій у сільському господарстві. Запровадження інтелектуальних систем у навчальні програми сприяє персоналізованому навчанню, розвитку критичного мислення студентів і створенню інноваційних рішень для наукових та виробничих завдань.

Аналіз літератури та результати дослідження. Поєднання штучного інтелекту з хімією та біотехнологією відкриває нові горизонти точності та ефективності цих галузей. Трансформація штучного інтелекту в хімію знаменує ключовий момент, коли алгоритми та дані об'єднуються, щоб зробити революцію у світі молекул [4]. Дослідницьку ділянку нині називають цифровою хімією, що охоплює інтеграцію передових засобів автоматизації, алгоритмів машинного навчання та застосування великих даних. Використовуючи цифрові інструменти для створення інноваційних робочих процесів, хімія розвивається швидшими, економічно ефективнішими та стійкішими темпами, що не тільки значно підвищує продуктивність, але й принципово змінює підхід хіміків до своєї роботи та інновацій. Це полегшує тягар трудомісткої експериментальної роботи та допомагає дослідникам отримати глибше розуміння механізмів реакції [19]. Застосування штучного інтелекту в хімії включає низку напрямків (рис. 1).

Використання алгоритмів машинного навчання важливо для прогнозування кінетики реакцій, виявлення каталізаторів та оптимізації умов синтезу. Наприклад,

нейронні мережі можуть передбачати вихідні продукти складних реакцій, що значно прискорює розробку нових хімічних сполук. Метод DFT (Density Functional Theory) у поєднанні з глибоким навчанням використовується для моделювання електронних структур молекул та їхньої реакційної здатності. Також, штучний інтелект допомагає в автоматизованій оптимізації параметрів хімічних реакцій, що зменшує кількість експериментів і ресурси, необхідні для синтезу нових речовин [12]. У промисловій хімії вже використовуються системи на основі ШІ для прогнозування впливу температури, тиску та складу реагентів на вихід реакцій у виробництві фармацевтичних препаратів, агрохімікатів та полімерів.



Рис. 1. Інтеграція штучного інтелекту у хімічні дослідження

Інтелектуальні системи дозволяють аналізувати структурні характеристики молекул, прогнозувати їх властивості та розробляти нові фармацевтичні препарати та агрохімікати. Використання глибоких нейронних мереж та алгоритмів штучного інтелекту, таких як рекурентні нейронні мережі (RNN) та графові нейронні мережі (GNN), дає змогу передбачати хімічну активність сполук, їхню токсичність та біодоступність [14]. Наприклад, платформи на основі ШІ, як-от AlphaFold, демонструють високу точність у прогнозуванні структури білків, що значно прискорює розробку нових ліків. Також використання генеративних моделей, таких як Variational Autoencoders (VAE) та Generative Adversarial Networks (GAN), сприяє створенню нових молекулярних структур із заданими фізико-хімічними властивостями. Крім того, ШІ

застосовується у розробці агрохімікатів, допомагаючи знаходити нові формули пестицидів і добрив, що мінімізують негативний вплив на довкілля та підвищують ефективність їхнього використання.

Штучний інтелект сприяє розробці екологічно чистих хімічних процесів, які зменшують використання токсичних реагентів і скорочують кількість відходів [1, 5]. Одним із ключових напрямів є використання алгоритмів машинного навчання для оптимізації каталітичних процесів у хімічній промисловості, що дозволяє замінити токсичні каталізatori на більш безпечні альтернативи. Наприклад, AI-моделювання допомагає у створенні біорозкладних полімерів та визначенні оптимальних умов для їхнього виробництва.

У сфері біоремедіації та екологічного моніторингу ШІ використовується для прогнозування розкладу забрудників і вибору ефективних мікроорганізмів для їхнього знешкодження [3]. Зокрема, технології глибокого навчання застосовуються для виявлення та оптимізації біокаталізаторів, що можуть розщеплювати пластмаси чи токсичні сполуки у воді та ґрунті.

Крім того, великі мовні моделі та нейромережі використовуються для аналізу екологічних даних та прогнозування наслідків забруднення. Це сприяє швидкому прийняттю рішень у сфері екологічного менеджменту та розробці більш сталих виробничих процесів.

Перспективи досліджень у цьому напрямі включають інтеграцію AI-засобів у процеси електрохімічного синтезу, розробку нових матеріалів для поглинання вуглекислого газу та вдосконалення методів прогнозування впливу хімічних речовин на екосистеми.

Штучний інтелект у біотехнологічних дослідженнях інтегрується у низку напрямів (рис. 2).

Штучний інтелект (ШІ) є важливим інструментом у сучасній біотехнології, забезпечуючи значний прогрес у таких напрямках, як обробка та аналіз біологічних даних, розробка лікарських засобів, редагування геному, ферментаційні процеси, екологічні біотехнології, нанобіотехнології та персоналізована медицина [15]. Інтеграція алгоритмів машинного та глибокого

навчання дозволяє не лише підвищити ефективність існуючих технологічних процесів, але й розробляти нові методи дослідження, які раніше були неможливі без використання великих масивів даних і складних обчислювальних підходів.



Рис. 2. Штучний інтелект у біотехнології

Одним із ключових напрямків є аналіз біологічних даних та біоінформатика. Сучасні алгоритми штучного інтелекту застосовуються для обробки високогенної інформації, отриманої з секвенування ДНК, протеомних та метаболомних досліджень [11]. Глибокі нейронні мережі дозволяють ідентифікувати функціональні елементи геному, передбачати структури білків (наприклад, за допомогою AlphaFold) та аналізувати взаємодії між молекулами. Машинне навчання дає можливість проводити класифікацію та прогнозування генетичних аномалій, що має важливе значення для персоналізованої медицини.

У розробці нових лікарських засобів штучний інтелект забезпечує значне скорочення термінів та витрат на дослідження, дозволяючи здійснювати віртуальний скринінг тисяч потенційних молекул за їх хімічною структурою та біологічною активністю. Алгоритми глибокого навчання використовуються для моделювання молекулярних взаємодій, що дає змогу прогнозувати токсичність та фармакокінетику лікарських препаратів [16]. Завдяки ШІ вдалося суттєво

покращити процеси розробки інгібіторів ферментів та білків-мішеней у терапії складних захворювань, таких як онкологія та нейродегенеративні патології [8].

Редагування геному та синтетична біологія також активно використовують ШІ для підвищення точності CRISPR-технологій. Алгоритми аналізу великих даних дозволяють прогнозувати можливі позацільові ефекти редагування, що зменшує ризики небажаних мутацій. Крім того, моделювання метаболічних шляхів у генетично модифікованих організмах дозволяє оптимізувати виробництво біопродуктів, таких як фармацевтичні білки, біополімери та метаболіти вторинного синтезу [20].

Ферментаційні та біопроцеси значно вииграють від застосування ШІ, оскільки автоматизовані системи керування дозволяють здійснювати реальний контроль біореакторів, оптимізувати параметри росту мікроорганізмів та передбачати вихід продукції на основі складних математичних моделей. Завдяки технологіям предиктивної аналітики можливо не лише мінімізувати використання ресурсів, а й забезпечити більш стабільну якість біотехнологічної продукції.

У сфері екології та агробіотехнології штучний інтелект використовується для моніторингу екологічного стану довкілля, прогнозування наслідків змін клімату та розробки адаптивних методів ведення сільського господарства [6]. Інтелектуальні системи здатні аналізувати супутникові зображення та геопросторові дані для виявлення деградації ґрунтів, оцінки рівня забруднення води та передбачення екологічних катастроф. У сільському господарстві ШІ застосовується для розробки систем прецизійного землеробства, що дозволяють оптимізувати внесення добрив, прогнозувати врожайність та покращувати управління біоресурсами.

Персоналізована медицина та діагностика активно використовують технології глибокого навчання для аналізу зображень медичної візуалізації, розшифровки генетичних профілів пацієнтів та створення індивідуальних схем лікування. Алгоритми комп'ютерного зору здатні ідентифікувати патологічні зміни на рівні клітинної структури з високою точністю, що дозволяє проводити діагностику на ранніх стадіях хвороби. Завдяки аналізу великих масивів

клінічних даних можливо створювати предиктивні моделі розвитку захворювань, що дає змогу лікарям приймати обґрунтовані рішення щодо лікувальної тактики, а також передбачувати ризики захворювань на основі багатофакторного аналізу [18].

Нанобіотехнології та біосенсори також використовують потенціал ІІІ для моделювання поведінки наночастинок у біологічних середовищах, що дозволяє розробляти інтелектуальні системи доставки лікарських препаратів [2]. Аналіз молекулярних взаємодій у реальному часі, що здійснюється за допомогою біосенсорів на основі ІІІ, відкриває нові можливості для створення швидких та точних методів діагностики інфекційних та онкологічних захворювань.

Штучний інтелект також відіграє важливу роль у прогнозуванні та моделюванні біологічних процесів. Цифрові двійники організмів та клітин дозволяють тестувати різні сценарії біологічних реакцій без необхідності проведення лабораторних експериментів, що значно скорочує витрати на дослідження та прискорює розробку нових біотехнологічних рішень [10].

Використання ІІІ має великі перспективи для аналізу сільськогосподарських систем, котрі ґрунтуються на використанні даних хімії та біотехнології. Інтерактивні моделі на основі великих даних допомагають зрозуміти вплив змін клімату, аналізувати агрохімічний склад ґрунтів та прогнозувати врожайність. ІІІ дозволяє створювати високоточні алгоритми для моніторингу стану полів, оцінювати якість ґрунту та виявляти зони, що потребують оптимізації живлення або зрошення. Наприклад, використання супутникових даних у поєднанні з нейронними мережами дає можливість автоматично визначати рівень вологості ґрунту та передбачати можливі посухи.

Крім того, ІІІ забезпечує розвиток автоматизованих систем управління фермерськими господарствами, включаючи роботизовані агротехнології для внесення добрив, оптимізації використання водних ресурсів та підвищення ефективності боротьби зі шкідниками [17]. Такі системи значно зменшують витрати на агротехнічні заходи та сприяють екологічно сталому землеробству.

Перспективність впровадження ІІІ у сільськогосподарську галузь підтверджується його здатністю значно підвищити продуктивність аграрного сектору. Наприклад, AI-алгоритми, що аналізують метеорологічні дані, можуть прогнозувати оптимальні строки посіву та збору врожаю, що мінімізує втрати і підвищує врожайність. Також впровадження автономних дронів для моніторингу полів і раннього виявлення хвороб рослин дозволяє своєчасно реагувати на проблеми, запобігаючи значним економічним втратам.

Окрім того, ІІІ має значний потенціал у розвитку тваринництва та птахівництва [21]. Використання розумних систем моніторингу здоров'я тварин дозволяє виявляти захворювання на ранніх стадіях, оптимізувати раціон харчування та підвищувати продуктивність виробництва. Наприклад, сенсорні технології та алгоритми ІІІ можуть аналізувати поведінку та стан тварин, автоматично регулювати температуру, вологість та умови утримання в залежності від їх потреб.

У птахівництві ІІІ застосовується для покращення селекційних програм, контролю якості кормів та прогнозування рівня продуктивності поголів'я. Також автоматизовані системи з елементами ІІІ допомагають у розподілі кормів, оптимізації режимів освітлення та регулюванні мікроклімату, що знижує рівень стресу у птахів та покращує їхній ріст і розвиток.

Перспективи використання ІІІ у тваринництві та птахівництві включають розробку цифрових платформ для віддаленого управління фермами, інтелектуальних систем для аналізу генетичних характеристик поголів'я та алгоритмів прогнозування поширення інфекційних захворювань. Інтеграція цих технологій сприятиме підвищенню економічної ефективності аграрного сектору, зниженню виробничих витрат та покращенню якості продукції. Розвиток інтелектуальних рішень у сфері тваринництва та птахівництва підвищує економічну ефективність галузі, забезпечує кращий контроль здоров'я тварин та допомагає запобігати поширенню епідемій, що має вирішальне значення у забезпеченні продовольчої безпеки країни.

Інтеграція штучного інтелекту у навчальні програми аграрних університетів сприятиме підготовці висококваліфікованих фахівців, здатних ефективно використовувати сучасні цифрові технології для управління аграрними підприємствами, підвищення ефективності сільськогосподарського виробництва та впровадження інноваційних рішень у сфері сталого розвитку агроєкосистем.

ШІ активно застосовується у хімічній та біотехнологічній освіті, забезпечуючи розробку інтерактивних навчальних платформ, адаптивних освітніх програм та віртуальних лабораторій. Персоналізоване навчання, засноване на алгоритмах адаптивного оцінювання знань, сприяє підвищенню якості підготовки студентів та аспірантів [7].

Впровадження цифрових платформ для виконання практичних експериментів у режимі реального часу без необхідності фізичних лабораторій. Завдяки штучному інтелекту (ШІ) такі лабораторії можуть використовувати складні алгоритми симуляції хімічних та біотехнологічних процесів, що дозволяє науковцям та студентам отримувати реалістичні результати без використання дорогого обладнання. Наприклад, алгоритми комп'ютерного моделювання на основі машинного навчання можуть прогнозувати реакції між молекулами, аналізувати вплив різних факторів на біологічні системи та симулювати виробничі процеси у біореакторах.

Крім того, потенціал ШІ у віртуальних лабораторіях дозволяє зробити навчання доступнішим для студентів з обмеженими фізичними можливостями. Інтерактивні інтерфейси, голосові команди та візуалізація 3D-моделей експериментів сприяють інклюзивному навчанню, забезпечуючи рівний доступ до сучасних методів дослідження. Наприклад, студенти з порушеннями зору можуть використовувати тактильні пристрої з підтримкою ШІ для аналізу структури молекул, а студенти з порушеннями слуху – отримувати автоматизовані текстові пояснення до процесів у лабораторії.

Перспективи розвитку віртуальних лабораторій включають інтеграцію доповненої та віртуальної реальності для створення більш занурюючого досвіду навчання, а також використання хмарних платформ для віддаленого доступу до симуляцій експериментів у реальному часі. Ці інновації сприятимуть формуванню

нової генерації фахівців, здатних ефективно працювати з цифровими технологіями у наукових і виробничих процесах.

Автоматизовані системи аналізують успішність студентів, формують індивідуальні траєкторії навчання та адаптують матеріали під потреби кожного студента. Використання великих даних (Big Data) у поєднанні з машинним навчанням дозволяє створювати детальні прогностичні моделі успішності студентів, ідентифікуючи фактори, що впливають на їхню академічну продуктивність. Наприклад, адаптивні платформи, такі як AI-освітні асистенти, здатні аналізувати поведінку студентів під час навчання, визначати їхні сильні та слабкі сторони та пропонувати персоналізовані навчальні стратегії. Окрім покращення індивідуального підходу, інтелектуальний аналіз успішності сприяє вдосконаленню навчальних програм. На основі автоматичного аналізу тестових результатів, активності студентів у навчальному середовищі та їхніх відгуків, ШІ може оптимізувати структуру курсів, пропонувати додаткові ресурси або змінювати підхід викладання для покращення розуміння матеріалу. Наприклад, у хіміко-біотехнологічних дисциплінах алгоритми ШІ можуть прогнозувати складності засвоєння певних тем і надавати студентам додаткові візуалізації, симуляції або інтерактивні вправи.

Перспективи розвитку інтелектуального аналізу навчання включають інтеграцію штучного інтелекту в системи предиктивної аналітики для раннього виявлення студентів, які потребують додаткової підтримки, а також впровадження доповненої та віртуальної реальності для покращення засвоєння складних наукових концепцій [13]. Такі підходи значно підвищують ефективність освітнього процесу, роблячи його більш гнучким, адаптивним та доступним для широкого кола студентів.

Використання чат-ботів, штучних інтелектуальних асистентів та персоналізованих рекомендаційних систем сприяє підвищенню якості освіти у хіміко-біотехнологічних спеціальностях. Адаптивні платформи на основі штучного інтелекту дозволяють аналізувати навчальний процес студентів у реальному часі, виявляючи прогалини у знаннях та підлаштовуючи навчальні матеріали відповідно до індивідуальних потреб кожного студента.

Застосування машинного навчання у таких платформах дає змогу прогнозувати рівень успішності, автоматично рекомендувати додаткові матеріали та оптимізувати освітній процес. Наприклад, алгоритми обробки природної мови (NLP) використовуються для автоматичного аналізу письмових робіт студентів, виявлення слабких місць у їхньому розумінні теми та надання персоналізованих пояснень. Інтеграція доповненої та віртуальної реальності у адаптивні платформи сприяє ефективному засвоєнню складних біохімічних і хімічних процесів через інтерактивні симуляції.

Перспективи розвитку адаптивних навчальних платформ включають застосування штучного інтелекту для створення індивідуалізованих траєкторій навчання, автоматизованих систем перевірки знань, а також підключення до глобальних освітніх ресурсів на основі AI-аналізу навчальних тенденцій. Це дозволить студентам отримувати доступ до найновіших досліджень і методологій, підвищуючи ефективність їхньої підготовки та рівень конкурентоспроможності на ринку праці.

Висновки. Використання ІІІ сприяє автоматизації експериментальних досліджень, прискоренню відкриттів у сфері хімії та біотехнологій, а також дозволяє ефективніше розробляти нові екологічні та енергозберігаючі технології. Загалом, інтеграція ІІІ у біотехнологію відкриває нові горизонти для досліджень і практичного застосування в галузі охорони здоров'я, фармацевтики, аграрних наук та екології. Використання потужних алгоритмів машинного навчання дозволяє підвищити ефективність виробничих процесів, скоротити витрати та прискорити розробку інноваційних технологій, що робить ІІІ одним із ключових факторів майбутнього розвитку біотехнологічної науки. Інтеграція штучного інтелекту у хімічні та біотехнологічні дослідження, а також освітній процес аграрних університетів є необхідністю сучасного етапу наукового та технологічного розвитку.

Застосування ІІІ в освіті дозволяє персоналізувати навчання, роблячи його доступним для ширшого кола студентів, зокрема для осіб з обмеженими можливостями. Впровадження адаптивних навчальних платформ, віртуальних лабораторій та AI-асистентів підвищує якість підготовки фахівців, що критично важливо для розвитку наукового потенціалу країни.

Для України, особливо у воєнний та післявоєнний періоди, інтеграція ІІІ є стратегічно важливою для відновлення та модернізації економіки. Використання інтелектуальних систем у сільському господарстві дозволяє оптимізувати виробничі процеси, підвищити врожайність, покращити якість агропродукції та мінімізувати втрати через зміну клімату або техногенні катастрофи. Зокрема, ІІІ сприяє відновленню деградованих земель, покращенню стану ґрунтів та екосистем шляхом оптимізованого використання добрив і біологічних засобів захисту.

Отже, впровадження ІІІ у науку та освіту є не лише інструментом підвищення ефективності, а й ключовим фактором стійкого розвитку України, що дозволяє забезпечити конкурентоспроможність в умовах глобальних викликів. У майбутньому ця технологія стане невід'ємною частиною сучасної освіти, особливо в аграрних, екологічних і біотехнологічних дисциплінах.

Список джерел

1. Цехмістренко С.І., Бітюцький В.С., Цехмістренко О.С. (2024). Використання зелених нанотехнологій у розвитку тваринництва в аспекті досягнення цілей сталого розвитку. Пріоритетні напрямки повоєнного відновлення аграрного сектору в аспекті досягнення цілей сталого розвитку: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. Біла Церква: БНАУ, 151–153.
2. Цехмістренко, С. І., Бітюцький, В. С., Цехмістренко, О. С., Демченко, О. А., Тимошок, Н. О., & Мельниченко, О. М. (2022). Екологічні біотехнології “зеленого” синтезу наночастинок металів, оксидів металів, металоїдів та їх використання, Біла Церква, 270 с.
3. Agoun, N. A., & Avci, F. G. (2025). Phycoremediation: a path towards heavy metal bioremediation from wastewater. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 100(1), 13-23. <https://doi.org/10.1002/jctb.7745>
4. Ali, R. S. A. E., Meng, J., Khan, M. E. I., & Jiang, X. (2024). Machine learning advancements in organic synthesis: A focused exploration of artificial intelligence applications in chemistry. *Artificial Intelligence Chemistry*, 2(1), 100049. <https://doi.org/10.1016/j.aichem.2024.100049>
5. Demchenko A., Bityutsky V., Tsekhmistrenko S., Tsekhmistrenko O., Kharchyshyn V. (2022). Synthesis of functionalized selenium nanoparticles with the participation of flavonoids. Multidisciplinary academic notes. Theory, methodology and practice. Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference. Tokyo, Japan, 29–35. DOI: 10.46299/ISG.2022.1.17
6. Espinel, R., Herrera-Franco, G., Rivadeneira García, J. L., & Escandón-Panchana, P. (2024). Artificial intelligence in agricultural mapping: A review. *Agriculture*, 14(7), 1071. <https://doi.org/10.3390/agriculture14071071>
7. Forero-Corba, W., & Bennasar, F. N. (2024). Techniques and applications of Machine Learning and Artificial Intelligence in education: a systematic review. *RIED-*

Revista Iberoamericana de Educación a Distancia, 27(1). DOI: <https://doi.org/10.5944/ried.27.1.37491>

8. Holmes, J., Sacchi, L., & Bellazzi, R. (2004). Artificial intelligence in medicine. *Ann R Coll Surg Engl*, 86, 334–338.

9. <https://mindthegraph.com/blog/uk/ai-in-academic-research/>

10. Imani, S., Li, X., Chen, K., Maghsoudloo, M., Jabbarzadeh Kaboli, P., Hashemi, M., ... & Li, X. (2025). Computational biology and artificial intelligence in mRNA vaccine design for cancer immunotherapy. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 14, 1501010. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1501010>

11. Kundaje, A., Pollard, K. S., Ma, J., Chang, X., Chen, M., & Rohs, R. (2025). Artificial intelligence in molecular biology. *Molecular Cell*, 85(2), 193–198.

12. Liu, X., Fan, K., Huang, X., Ge, J., Liu, Y., & Kang, H. (2024). Recent advances in artificial intelligence boosting materials design for electrochemical energy storage. *Chemical Engineering Journal*, 151625. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151625>

13. Mao, J., Chen, B., & Liu, J. C. (2024). Generative artificial intelligence in education and its implications for assessment. *TechTrends*, 68(1), 58–66.

14. Martin, P. P., & Graulich, N. (2024). Navigating the data frontier in science assessment: Advancing data augmentation strategies for machine learning applications with generative artificial intelligence. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 7, 100265. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100265>

15. Omid P., Reza S. (2024). How artificial intelligence and biotechnology are transforming dentistry. *Adv Biotech & Micro*, 18(2), 555981. DOI: 10.19080/AIBM.2024.17.555981

16. Saifi, I., Bhat, B. A., Hamdani, S. S., Bhat, U. Y., Lobato-Tapia, C. A., Mir, M. A., ... & Ganie, S. A. (2024). Artificial intelligence and cheminformatics tools: a contribution to the drug development and chemical science. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 42(12), 6523–6541. <https://doi.org/10.1080/07391102.2023.2234039>

17. Sharma, K., & Shivandu, S. K. (2024). Integrating artificial intelligence and internet of things (IoT) for enhanced crop monitoring and management in precision agriculture. *Sensors International*, 100292. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2024.100292>

18. Shiferaw, K. B., Roloff, M., Balaur, I., Welter, D., Waltemath, D., & Zeleke, A. A. (2025). Guidelines and standard frameworks for artificial intelligence in medicine: a systematic review. *JAMIA open*, 8(1), ooae155. <https://doi.org/10.1093/jamiaopen/ooae155>

19. Strieth-Kalthoff, F., Szymkuc, S., Molga, K., Aspuru-Guzik, A., Glorius, F., & Grzybowski, B. A. (2024). Artificial intelligence for retrosynthetic planning needs both data and expert knowledge. *Journal of the American Chemical Society*, 146(16), 11005–11017. <https://doi.org/10.1021/jacs.4c00338>

20. Vilhekar R. S., Rawekar A. (2024). Artificial Intelligence in Genetics. *Cureus* 16(1): e52035. DOI 10.7759/cureus.52035

21. Zhang, L., Guo, W., Lv, C., Guo, M., Yang, M., Fu, Q., & Liu, X. (2024). Advancements in artificial intelligence technology for improving animal welfare: Current applications and research progress. *Animal Research and One Health*, 2(1), 93–109. <https://doi.org/10.1002/aro2.44>