



ТЕОРІЯ І МЕТОДИКА НАВЧАННЯ

УДК 378.147:004.8:51

DOI <https://doi.org/10.5281/zenodo.20345317>

Інтеграція інструментів штучного інтелекту у викладання вищої математики: дидактичні можливості

Семенишина Ірина Віталіївна

кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій, фізико-математичних та безпекових дисциплін, Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», Україна, м. Кам'янець-Подільський, вул. Шевченка, 12, <https://orcid.org/0000-0002-0487-6152>

Воробйов Яків Анатолійович

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри математики, інформатики та інформаційної діяльності, Ізмаїльський державний гуманітарний університет, Україна, Одеська обл., м. Ізмаїл, вул. Ріпіна, 12, <https://orcid.org/0000-0003-0729-4649>

Снітко Юлія Миколаївна

старший викладач кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем, Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Україна, м. Полтава, Віталія Грицаєнка просп., 24, <https://orcid.org/0009-0002-7115-3867>

Прийнято: 11.04.2026 | Опубліковано: 26.04.2026

***Анотація:** Стрімке поширення інструментів штучного інтелекту в освітньому просторі спонукає до переосмислення усталених підходів до викладання дисциплін у закладах вищої освіти. Вища математика постає особливо показовим контекстом через те, що її внутрішня логіка, заснована на*



формальній строгості та дедуктивному мисленні, створює специфічні умови, за яких дидактичний потенціал штучного інтелекту виявляється нерівномірним і потребує окремого осмислення. **Мета** статті полягає у вивченні та впровадженні дидактичних можливостей інструментів штучного інтелекту у викладанні вищої математики з урахуванням змістового та методичного вимірів цього процесу. **Методи:** систематизація та порівняльний аналіз наукових публікацій за 2021–2026 рр., узагальнення емпіричних даних зарубіжних і українських досліджень, класифікаційне моделювання. **Результати.** Розроблено авторську класифікацію інструментів штучного інтелекту за 12 дидактичними функціями. З'ясовано, що їхня ефективність суттєво диференціюється залежно від розділу дисципліни. У процедурних обчислювальних задачах вона є достатньо обґрунтованою, тоді як у роботі з математичними доведеннями – обмеженою та подекуди суперечливою. Обґрунтовано доцільність тріадної стратегії, що поєднує генеративні моделі, спеціалізовані математичні системи й адаптивні платформи відповідно до базових освітніх потреб здобувача освіти. **Висновки.** Результативна інтеграція штучного інтелекту у викладання вищої математики є досяжною, однак не зводиться до простого впровадження технологій у навчальний процес. Вона передбачає методичну усвідомленість педагога, чітке розуміння меж кожного інструменту та збереження когнітивного навантаження як необхідної умови розвитку математичного мислення. Принципово важливим є те, що штучний інтелект найбільш органічно вписується в роль доповнення до педагогічної дії, а не її заміника. Там, де інструмент автоматизує рутинний зворотний зв'язок, викладач отримує простір для роботи з концептуальним розумінням та якістю аргументації здобувача. Саме такий розподіл є методично продуктивним.



Ключові слова: математична освіта, ChatGPT, педагогічна компетентність, критичне мислення, генеративні моделі, адаптивні платформи, спеціалізовані математичні системи.

Integrating artificial intelligence tools into the teaching of advanced mathematics: Didactic opportunities

Iryna Semenyshyna

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Technology, Physical, Mathematical and Civil Defence Disciplines, Higher Educational Institution “Podillia State University”, Ukraine, Kamianets-Podilskyi, Shevchenko Str., 12,

<https://orcid.org/0000-0002-0487-6152>

Yakiv Vorobiov

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics, Informatics and Information Activities, Izmail State University of Humanities, Ukraine, Odesa region, Izmail City, 12 Repina Street,

<https://orcid.org/0000-0003-0729-4649>

Yuliia Snitko

Senior Lecturer of the Department of Computer and Information Technologies and Systems, Educational and Research Institute of Information Technologies and Robotics, National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”, Ukraine, Poltava, 24 Vitalia Hrytsayenko Ave., <https://orcid.org/0009-0002-7115-3867>

Abstract: *The rapid proliferation of artificial intelligence tools in the educational sphere calls for a rethinking of established approaches to teaching disciplines in higher education institutions. Advanced mathematics presents a particularly illustrative context because its internal logic, grounded in formal rigor and deductive reasoning,*



*creates specific conditions under which the didactic potential of artificial intelligence is uneven and requires separate consideration. **This article aims** to study and implement the didactic potential of artificial intelligence tools in the teaching of higher mathematics, taking into account the content and methodological dimensions of this process. **Methods:** systematization and comparative analysis of scientific publications from 2021–2026, generalization of empirical data from foreign and Ukrainian studies, and classificatory modeling. **Results.** An original classification of artificial intelligence tools based on 12 didactic functions has been developed. It has been found that their effectiveness varies significantly across subject areas. In procedural computational tasks, it is sufficiently well-founded, whereas in working with mathematical proofs, it is limited and sometimes controversial. The feasibility of a three-pronged strategy that combines generative models, specialized mathematical systems, and adaptive platforms to meet the students' basic educational needs has been substantiated. **Conclusions.** The effective integration of artificial intelligence into the teaching of higher mathematics is achievable, but it is not limited to simply introducing technologies into the educational process. It requires the teacher's methodological awareness, a clear understanding of each tool's limitations, and the preservation of cognitive load as a necessary condition for the development of mathematical thinking. Artificial intelligence must fit most naturally into the role of a supplement to pedagogical action, rather than a substitute for it. Where the tool automates routine feedback, the instructor gains space to work on the student's conceptual understanding and the quality of their reasoning. It is precisely this division of labor that is methodologically productive.*

Keywords: *mathematics education, ChatGPT, pedagogical competence, critical thinking, generative models, adaptive platforms, specialized mathematics systems.*

Постановка проблеми. Цифрова трансформація вищої освіти актуалізує питання, яке ще декілька років тому здавалося суто теоретичним: «Чи здатні



інструменти штучного інтелекту змінити саму логіку викладання академічних дисциплін?» Вища математика в цьому контексті є наочним прикладом. З одного боку – це дисципліна з чіткою внутрішньою структурою, де алгоритмічність і формальна строгість є не методичним вибором, а змістовою вимогою. З другого – саме ця структурованість робить математику потенційно «зручним» полігоном для інструментів на основі штучного інтелекту (ШІ), орієнтованих на покрокове розв’язання задач та автоматизований зворотний зв’язок.

Однак між технічною можливістю та дидактичною доцільністю існує значна відстань. Здобувач освіти може скопіювати правильно обчислений інтеграл за допомогою ШІ, але так і не зрозуміти, який метод інтегрування застосовано та чому саме він. Така розбіжність між операційним результатом і концептуальним розумінням становить, на нашу думку, центральну педагогічну проблему інтеграції ШІ у викладання вищої математики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання інтеграції цифрових інструментів у математичну освіту набуло нового виміру після впровадження генеративних моделей ШІ, насамперед, ChatGPT в Україні з’явився у 2023 р. На той момент його використовувало 22,2% українців [1], а у 2026 р. – 49% [2]. Це викликає широку дискусію, зокрема, занепокоєння щодо практичного застосування інструментів ШІ у вищій освіті [3]. Подібна увага закономірна, адже вища математика є одним із предметів, де потенційний вплив ШІ є водночас найбільш обіцяючим і найбільш суперечливим.

Одним із найрепрезентативніших на сьогодні оглядів є дослідження Л. А. Аванга, Ф. Д. Юсопа та М. Данаї, яке систематизує 20 комерційних ШІ-інструментів для математичної освіти й охоплює рівні від початкової до вищої школи. Адаптивні системи та персоналізація на основі даних мають значний вплив на покращення навчального досвіду через індивідуалізацію інструкцій, а використання ШІ в гейміфікованих середовищах ефективно підвищує залученість здобувачів і закріплює математичні концепції [4]. Разом із тим цей



підхід є обмеженим, оскільки більшість аналізованих інструментів орієнтовані на середню освіту та лише п'ять з них на університетський рівень. Це пов'язано з тим, що логіко-дедуктивне мислення та формальна строгість доведень у вищій математиці становлять принципову дидактичну специфіку.

Окреме місце займає питання навчальних досягнень студентів. Так, Дж. Ван і В. Фан провели огляд 51 дослідження за 2022–2025 рр. і встановили, що ChatGPT має великий позитивний вплив на навчальну успішність ($g=0,867$) та помірно позитивний на навчальне сприйняття ($g=0,456$) і розвиток мислення вищого порядку ($g=0,457$). Вплив на успішність суттєво модерується типом курсу, моделлю навчання та тривалістю використання інструменту. Примітно, що найсильніший ефект зафіксовано саме в STEM-дисциплінах, і це є важливим аргументом на користь цілеспрямованої, методично вивіреної інтеграції ШІ у вищу математику, а не її стихійного запровадження. Зокрема, ChatGPT у ролі інтелектуального тьютора має особливо сильний вплив на розвиток мислення вищого порядку, надаючи персоналізовані настанови, зворотний зв'язок та оцінювання [5].

Систематичний огляд застосування ШІ у вищій математичній освіті, проведений А. М. Мсомі та Т. М. Мтетва, підтвердив, що нові технології мають потенціал покращити прийняття рішень на основі даних, зворотний зв'язок у реальному часі та персоналізоване навчання, забезпечуючи ефективне та цікаве навчальне середовище [6]. Водночас А. М. Аль-Захрані та Т. М. Аласмарі застерігають, що існують потенційні ризики надмірної залежності від ШІ, та наголошують на необхідності збалансованої інтеграції, щоб не зупинити розвиток критичного мислення [7]. Ця суперечність між можливостями персоналізації і ризиком когнітивного «знецінення» є, мабуть, ключовою напругою у всьому корпусі сучасних досліджень.

Особливе місце займає питання можливостей і меж ChatGPT у розв'язанні математичних задач. Оглядове дослідження Б. Пепіна, Н. Бухгольц та



У. Салінас-Ернандес фіксує, що GPT-4 виявився корисним для здобувачів бакалаврату, проте не досяг рівня аспіранта в складніших задачах, коли загальна математична продуктивність не відповідала рівню студента магістерської програми. Окремо відзначено, що ChatGPT може бути успішно використаний як математичний асистент для пошуку фактів, виступаючи своєрідною математичною пошуковою системою та інтерфейсом бази знань [8]. Цей висновок частково підтверджує думку про те, що у викладанні вищої математики ШІ-інструменти доцільно розглядати передусім як допоміжний когнітивний ресурс, а не як заміник концептуального пояснення з боку викладача. Ба більше, у результатах дослідження Д. Кая та С. Явуз описано, що ChatGPT досягав 83 % успіху на процедурних математичних завданнях, але зазнавав труднощів із задачами, що потребують концептуальної глибини [9].

Проблема критичного мислення є однією з найбільш дискусійних. Систематичний огляд М. Турмузі та ін., що синтезував 20 емпіричних статей за 2023–2025 рр. на базі методології PRISMA, виявив три ключові прогалини в попередніх дослідженнях: нез'ясований вплив ChatGPT на розвиток критичного мислення здобувачів, брак порівняльних досліджень ефективності ChatGPT на різних освітніх рівнях, а також обмеженість практичних настанов щодо інтеграції ChatGPT у чинні програми з математики [10]. Це є принциповим, оскільки фокус на процедурних навичках (обчислення, алгоритм) без урахування концептуального розуміння залишається головною методологічною прогалиною значної частини публікацій, адже вища математика ґрунтується саме на здатності здобувача будувати доведення, а не лише виконувати операції. У свою чергу, Д. Равшель та ін. провели масштабне глобальне дослідження за участю 23 218 здобувачів освіти зі 109 країн і зазначили, що вони вважають ChatGPT корисним для спрощення складної інформації та узагальнення контенту, але менш надійним для отримання інформації і підтримки аудиторного навчання. При цьому більшість погодилися, що він менш ефективний для розвитку навичок



критичного мислення та числової грамотності [11]. Останнє спостереження є особливо важливим для контексту вищої математики.

Не менш вагомим є питання педагогічної готовності викладачів. Наприклад, І. Челік запропонував концепцію Intelligent-TPACK (Technological Pedagogical Content Knowledge) як розширення класичної рамкової моделі TPACK з урахуванням специфіки ІІІ. Автор розробив шкалу вимірювання знань учителів для навчання з використанням ІІІ та встановив, що технологічні і педагогічні знання є вирішальними для ефективної інтеграції ІІІ-інструментів, тоді як суто технологічне знання, без педагогічного компонента, недостатнє для освітньої інтеграції ІІІ [12]. Така ідея потребує подальшого дослідження щодо специфіки математичних дисциплін, чи є педагогічні вимоги до ІІІ-грамотності викладача математики відмінними від загальнодидактичних?

Розширена рамкова модель AI-TPACK охоплює сім компонентів: педагогічні знання (РК), змістовні знання (СК), технологічні знання зі штучного інтелекту (AI-ТК), педагогічні змістовні знання (РСК), технологічні педагогічні знання зі штучного інтелекту (AI-ТСК), технологічні знання зі змісту зі штучного інтелекту (AI-ТРК) та власне AI-TPACK. Дослідження Й. Нін та ін., яке охопило 366 учителів у Китаї, показало, що всі шість компонентів є предикторами AI-TPACK, однак із різною прогностичною силою. Отримані дані можна припустити як частково валідні і для українського контексту вищої математичної освіти, хоча пряме перенесення результатів залишається дискусійним через суттєві відмінності в педагогічних традиціях і матеріально-технічній базі. Важливо, що вчителі з сильним TPACK і позитивним ставленням до ІІІ більш схильні інтегрувати ІІІ-інструменти у викладання, а ставлення педагога до нових технологій є значущим предиктором їх фактичного використання в аудиторії [13].

Кількісні дані підтверджують, що проблема нерівномірного впровадження є загальносвітовою. За результатами дослідження Дж. Г. Кауфман та ін. лише



чверть учителів використовували ІІІ-інструменти в навчальному плануванні або викладанні. При цьому вчителі природничих наук і словесності вдвічі частіше зверталися до ІІІ, ніж вчителі математики [14]. Такий різкий контраст ймовірно відображає особливу консервативність математичної педагогіки або ж недостатню адаптованість наявних інструментів до дисциплінарної специфіки. Другий пояснювальний механізм видається більш переконливим: *«аналіз даних PISA 2022 виявив рекордне падіння середнього балу з математики на 15 пунктів порівняно з 2018 роком у країнах ОЕСР, що підкреслює нагальну потребу в ефективній цифровій інтеграції»* [15].

Серед українських публікацій варто виокремити кілька важливих спроб осмислити ці процеси. Так, М. Стойка та Ю. Петечук дослідили можливості ChatGPT для автоматизованого генерування математичних задач і встановили, що він здатний ефективно генерувати як прості, так і складні математичні задачі, відкриваючи нові можливості для автоматизації підготовки вчителів до занять. Водночас науковці зафіксували суттєве обмеження, оскільки якість задач залежить від точності запитів, а в складних обчисленнях виникають помилки [16]. Натомість О. Є. Богатєнкова проаналізувала обізнаність здобувачів освіти щодо математичних ІІІ-програм і констатувала: *«Попри стрімкий розвиток освітніх інструментів на основі штучного інтелекту, їхнє застосування в навчанні математики залишається несистемним і недостатньо методично обґрунтованим»* [17, с. 9]. Практику використання нейронних мереж у математичній освітній галузі в Україні систематизували Т. М. Собченко, С. О. Доценко та А. В. Боярська-Хоменко, наголошуючи, що ІІІ-технології здатні сприяти новим методам викладання та навчання, а не лише підвищувати зручність роботи вчителя [18].

Розглядаючи загальні тенденції використання ІІІ у вищій освіті, А. Г. Андрощук та О. С. Малюга наголошують на важливості академічної

добросовісності і необхідності стратегічних підходів до цифрового навчання в Україні [3].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Аналізуючи наведені джерела в сукупності, можна виокремити кілька системних прогалин. По-перше, більшість досліджень зосереджена або на шкільній математиці, або на освіті загалом без урахування специфічних дидактичних вимог вищої математики як дисципліни закладу вищої освіти. По-друге, переважає вивчення інструментального аспекту (які функції виконує ІІІ) на шкоду методичному (як саме вбудувати ці функції у логіку конкретного заняття). По-третє, в українськомовному науковому просторі бракує емпіричних досліджень, що поєднували б аналіз досвіду здобувачів і педагогічну рефлексію викладачів у контексті вищої математики.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Мета статті – дослідити конкретні дидактичні можливості ІІІ-інструментів у викладанні вищої математики з урахуванням змістового та методичного вимірів цього процесу. Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні завдання:

- 1) систематизувати наявні ІІІ-інструменти за їх дидактичними функціями в контексті викладання вищої математики;
- 2) проаналізувати змістовий потенціал ІІІ-інструментів щодо ключових розділів вищої математики;
- 3) визначити методичні підходи до інтеграції ІІІ в різні форми навчальної діяльності під час вивчення вищої математики.

Виклад основного матеріалу дослідження. Перш ніж аналізувати методичний потенціал ІІІ, доцільно впорядкувати наявний інструментарій. У таблиці 1 представлено авторську систематизацію основних інструментів, релевантних для вищої математики, за провідними дидактичними функціями.

Таблиця 1

Систематизація ІІІ-інструментів за дидактичними функціями

Дидактична функція	Що саме робить інструмент у контексті вищої математики	Інструменти
Пояснювальна	Покрокове роз'яснення теорем, означень, методів; адаптація мови пояснення до рівня здобувача; відповіді на уточнювальні запитання в діалозі	ChatGPT, Claude, Gemini, Microsoft Copilot
Обчислювально-розв'язувальна	Точне виконання аналітичних перетворень, розв'язання рівнянь, систем, інтегралів, меж, диференціальних рівнянь	Wolfram Alpha, Symbolab, Mathway, Mathematica Online
Візуалізаційна	Побудова графіків функцій, кривих, поверхонь, тіл обертання; динамічна зміна параметрів; фазові портрети, поля напрямків	GeoGebra (3D, динаміка), Desmos, Wolfram Alpha (графіки), Maple Calculator
Генеративна	Автоматичне створення задач різного рівня складності, варіантів контрольних, тестових запитань за заданою темою та параметрами	ChatGPT, Wolfram Problem Generator, Khanmigo
Діагностична	Виявлення прогалин у знаннях здобувача, розпізнавання типових помилок, побудова індивідуальної траєкторії	ALEKS, MATHia, Khan Academy, Photomath
Зворотній зв'язок	Миттєвий формувальний відгук на розв'язок: де помилка, чому, як виправити	MATHia, ChatGPT (при правильному промптингу), Symbolab Pro
Тьюторська / асистентська	Діалоговий супровід у стилі репетитора: здобувач веде розв'язок, ІІІ ставить запитання або підказує наступний крок	ChatGPT, PAT2Math, GeoGebra Math Practice, Khanmigo
Перевірка доведень	Верифікація логічних кроків доведення; виявлення логічних розривів; пропозиція альтернативних підходів до доведення	Wolfram Alpha (символьна перевірка), ChatGPT (не завжди коректно), Lean Copilot
Зниження когнітивного навантаження	Розбиття складної задачі на підзадачі, декомпозиція багатокрокових доведень, скаффолдинг для здобувачів зі слабкою базою	ChatGPT, Claude, Khanmigo
Мотиваційна / ігрова	Гейміфікація вивчення математичних концепцій, формування звички регулярної практики через ігрові механіки	Brilliant, Mathigon (Polypad)
Адаптивне навчання	Автоматичне підлаштування складності та послідовності завдань залежно від поточного рівня здобувача в реальному часі	ALEKS, MATHia, Khan Academy, Smart Sparrow
Організаційно-планувальна	Допомога викладачеві в плануванні занять, складанні силабусу, підготовці лекційних матеріалів	ChatGPT, Claude, MagicSchool AI

Джерело: власна розробка авторів.



Наведена класифікація є умовною, оскільки на практиці більшість інструментів поєднують кілька функцій одночасно, і провести між ними чітку межу не завжди можливо. Проте для методичного проєктування таке розмежування є необхідним.

Важливо розуміти, що існує принципова різниця між трьома типами ШІ-інструментів у математичній освіті. Перший тип включає генеративні мовні моделі (ChatGPT, Claude, Gemini, Microsoft Copilot), які «розуміють» контекст запиту, ведуть діалог, пояснюють ідею різними словами та відповідають на уточнення. Їхня перевага полягає в гнучкості й адаптивності, а недолік у тому, що вони можуть помилятися в обчисленнях і, що особливо небезпечно, робити це впевнено. Другий тип – це спеціалізовані математичні інструменти (Wolfram Alpha, Symbolab, GeoGebra, Desmos, Mathematica Online), вони обчислюють точно, будують коректні графіки та перевіряють символічні перетворення. Але вони не пояснюють процес, а лише виконують. Здобувач отримує результат, проте не завжди розуміє, як до нього дійшли. Третій тип – адаптивні навчальні системи, як-от: ALEKS, MATHia, PAT2Math, Smart Sparrow. На відміну від двох попередніх, вони відстежують індивідуальний прогрес здобувача та підлаштовують складність завдань у реальному часі, що робить їх особливо цінними для систематичної практики.

Кожен із цих типів закриває власну дидактичну нішу, але водночас жоден з них не є самодостатнім. Тому, на нашу думку, найбільш ефективною стратегією є не вибір одного «найкращого» інструменту, а їх свідомо комбінація. Генеративну модель використовувати для концептуального розуміння та діалогу, спеціалізований інструмент – для точних обчислень і верифікації результатів, адаптивну систему – для регулярної практики зі структурованим зворотним зв'язком. Саме така тріада відповідає трьом базовим освітнім потребам здобувача в процесі опанування вищої математики: концептуальному розумінню, виконанню обчислень і закріпленню навчального матеріалу.



Систематизація інструментів за дидактичними функціями дозволяє зрозуміти їх потенціал у контексті використання в ключових розділах вищої математики. Розподіл потенціалу є нерівномірним і про це в більшості дослідженнях говориться побіжно, що є суттєвою прогалиною.

Потенціал використання ШІ-інструментів у математичному аналізі є найбільш доведеним на процедурному рівні. У дослідженні З. А. Пардос та Ш. Бхандарі встановлено, що підказки, згенеровані ChatGPT, забезпечують статистично значущі прирости навчальних результатів у групах, які вивчають алгебру на відміну від контрольної групи, яка не використовує ChatGPT. Відмінність між якістю навчання з ChatGPT і з підказками людини-тьютора виявилась статистично незначущою [19]. Це частково підтверджує гіпотезу про те, що для операційних добре структурованих задач генеративний ШІ може ефективно замінювати формат індивідуальних консультацій, принаймні в контексті підказок і зворотного зв'язку, а не глибинного пояснення концепцій. Водночас той самий експеримент показав, що 32 % підказок, згенерованих ChatGPT, містили помилки в розв'язанні або у відповіді [19]. Виходить, що якість відповіді прямо залежить від методики промптингу, а це означає, що використання таких інструментів без відповідного методичного супроводу є обмеженим і потенційно шкідливим.

Аналіз виступу ChatGPT на в'єтнамському національному іспиті показав, що інструмент найкраще справляється із завданнями рівня «знання», натомість зі зростанням складності його результат падає з 82 % до 10 %. Найбільші труднощі виникли з темами похідних і їх застосувань, просторової геометрії та просторового числення [8]. Це означає, що для рутинних обчислень на практичному занятті ChatGPT цілком придатний, але для концептуальних задач на доведення вже значно менш надійний.

М. Турмузі та ін. підтвердили, що ChatGPT ефективно забезпечує миттєвий зворотний зв'язок у 70 % випадках і цей ефект найвиразніший саме в



алгебрі та статистиці [10]. Такі дані дещо суперечать результатам дослідження А. Удіас та ін., де ChatGPT 4.0 показав гірші результати в алгебрі порівняно зі своєю успішністю в теорії ймовірностей і статистиці, хоча загалом перевершував здобувачів в усіх галузях, окрім алгебри [20]. Це, на нашу думку, пов'язано зі структурою задач, оскільки велика частина ймовірнісних завдань зводиться до застосування формул за чітко визначеною процедурою. Натомість задачі, що потребують побудови ймовірнісної моделі «з нуля» чи інтерпретації результату в реальному контексті, залишаються проблематичними та потребують подальшого дослідження.

Wolfram Alpha займає особливе місце серед ШІ-інструментів для вищої математики. Система забезпечує широке покриття задач диференціального та інтегрального числення, диференціальних рівнянь, лінійної алгебри від базових операцій до чисельних методів на кшталт методу Рунге-Кутта. Принципова відмінність Wolfram Alpha від генеративних мовних моделей полягає в детермінованості. На відміну від ChatGPT або Gemini, здатних «вигадувати» хибні кроки розв'язання, Wolfram Alpha завжди дає однакову коректну відповідь для одних і тих самих вхідних даних, що робить його надійним інструментом для перевірки домашніх завдань та дослідницьких обчислень.

Окремої уваги заслуговує лінійна алгебра. У роботі Е. Нікол тестування ChatGPT виявило, що перші помилки в лінійній алгебрі з'явилися вже при матричному множенні. Тобто, коли завдання подавалось у вигляді зображення модель не впоралась із задачею коректно [21]. Загалом ChatGPT демонструє недоліки саме в завданнях, що вимагають міркувань, побудови доведень і конструювання моделей [21]. Водночас у дослідженні Н. Л. Телесс описано підхід, за якого викладачі університету використовували специфічну стратегію промптингу для генерування зворотного зв'язку щодо задач лінійної алгебри у формі слівних задач, і такий підхід виявився продуктивним для формативного



оцінювання [22]. Це частково підтверджує думку, що ІІІ у вищій математиці не може бути автономним, адже він потребує педагогічного управління.

Мабуть, найбільш дискусійним є потенціал ІІІ в розділах, де центральним елементом постає побудова математичних доведень. Дослідження Х. Юн та ін. вивчало взаємодію здобувачів бакалаврського рівня із генеративним ІІІ при доведенні математичних тверджень і виявило три ключові чинники, що визначають характер цієї взаємодії: розуміння природи доведення, ставлення до ІІІ й етичні міркування [23]. Примітно, що дослідження прямо закликає до формування у здобувачів критичного, а не пасивного ставлення до виходів генеративного ІІІ при роботі з доведеннями [23]. Можна припустити, що пасивне прийняття згенерованих доведень є особливо небезпечним саме для вищої математики, де доведення є не результатом, а способом мислення.

Паралельно розвивається зовсім інша лінія – інструменти формальної верифікації доведень. Система AlphaProof від Google DeepMind у 2024 р. вирішила чотири з шести задач Міжнародної математичної олімпіади, досягнувши рівня срібного медаліста, і це стало першим подібним результатом в умовах формальної верифікації [24]. Для вищої освіти більш практичним прикладом є інструмент HaLLMos, який дозволяє здобувачам перевіряти власні доведення до подання викладачу, отримуючи зворотний зв'язок у реальному часі без прямих підказок щодо розв'язку [25]. Різниця між HaLLMos і загальними мовними моделями принципова, тому що перший спрямований на підтримку когнітивного процесу, а другі – на надання відповіді. Вважаємо доцільним розглядати ці два підходи як доповнювальні, а не конкурентні.

Узагальнюючи, можна виокремити потенціал ІІІ-інструментів у вищій математиці: найвища ефективність ІІІ-підтримки зафіксована в стандартизованих обчислювальних задачах алгебри, аналізу та статистики; помірна – в задачах лінійної алгебри за умови коректно спроектованого промптингу; найнижча та найбільш суперечлива – в роботі з математичними



доведеннями. Запропонована ієрархія, однак, не є незмінною, оскільки розвиток спеціалізованих інструментів формальної верифікації на кшталт NaLLMos поступово змінює ситуацію в останній категорії, хоча кінцевий вплив подібних інструментів на глибину математичного розуміння здобувачів потребує подальшої перевірки.

Головне дослідницьке питання цієї статті полягає не в тому, чи варто інтегрувати ШІ-інструменти в навчання вищої математики, а в тому, які форми навчальної діяльності найбільш органічно поєднуються з тим чи іншим типом інструменту, де ШІ доповнює педагогічну дію викладача, а де підміняє її, не завжди на краще.

У лекційній формі ШІ зазвичай розглядається не як інструмент реального часу, а як підготовчий або доповнюючий ресурс. Генеративні ШІ-системи здатні супроводжувати багатокрокові стратегії розв'язання задач, пропонуючи діалоговий режим, пояснення та множинні представлення одного і того ж поняття [26]. Це особливо цінно в умовах лекцій із вищої математики, де здобувачі мають неоднорідну підготовку. Одні сприймають символічне пояснення відразу, інші потребують ще однієї спроби через числовий приклад, геометричну інтерпретацію або аналогію. Водночас майбутні вчителі математики, які брали участь у дослідженні М. Р. Кім та ін., відзначили серед переваг ChatGPT саме здатність генерувати різноманітні приклади та підходи до розв'язання для одного поняття, що забезпечує більш насичений навчальний досвід [27]. Однак, ті ж учасники дослідження [27] висловлювали занепокоєння щодо частих неточностей у відповідях ChatGPT, які можуть спричинити нерозуміння та підривають довіру до інструменту. На нашу думку, саме в лекційному контексті це є найнебезпечнішим. Наприклад здобувач, який отримав неправильне пояснення деривативу чи хибну ілюстрацію збіжності ряду до лекції, приходить із вже закріпленим помилковим уявленням. Отже,



методично правильно використовувати ІІІ як одне із джерел пояснення, яке верифікується викладачем або самим здобувачем.

Практичні заняття – це форма, де змістовий потенціал ІІІ розкривається найповніше. Системи ITS (Intelligent Tutoring Systems) автоматизують формативне оцінювання, персоналізують темп проходження матеріалу та забезпечують детальну аналітику, яка інакше перевищувала б можливості людини. У дослідженні А. Летурно та ін. за методикою MIATS (Mathematics Intelligent Assessment and Tutoring System) експериментальна група, яка отримувала покрокові підказки з персоналізованим зворотним зв'язком на кожному хибну відповідь, продемонструвала статистично значущі прирости навчальних результатів порівняно з контрольною групою, де зворотний зв'язок зводився лише до позначення відповіді як правильної або неправильно [28]. Різниця між «правильно/неправильно» й «ось де саме помилка і як її виправити» є принциповою. Другий формат є значно ближчим до реального тьюторського навчання. Проте К. Холман та ін. нагадують, що цінність ІІІ для осмисленого навчання залежить від залученості викладача [29], але це суттєво обмежує сценарій «повного ІІІ-тьюторингу» без педагогічного контролю.

Модель «перевернутого класу» передбачає, що здобувач самостійно опрацьовує матеріал до заняття, тому саме тут ІІІ може зіграти ключову роль у підтримці саморегуляції. Так, П.-Х. Лі тестували ChatGPT на питаннях тайванських освітніх іспитів і встановили рівень точності відповідей близько 90 % (рейтинг A+), при цьому точність у кожній із шести основних галузей математики перевищувала 80 %, що дозволяє розглядати ChatGPT як інструмент підтримки саморегульованого навчання в перевернутому класі [30]. Паралельно система CILA (Custom Instruction Large Agent) на базі ChatGPT у контексті змішаного навчання позитивно впливала на самоефективність здобувачів і зменшувала їхню фрустрацію, тому що наявність історії запису попередніх



питань і відповідей під час фази саморефлексії спонукала до повторного перегляду власних сильних та слабких сторін [31].

Слід акцентувати, що зазначений підхід є обмеженим, оскільки не всі здобувачі вміють ставити продуктивні питання до ШІ-інструменту. Методологічно важливо навчити їх промптингу не як технічній навичці, а як педагогічній стратегії, а саме: формулювати питання, запитувати про помилку та просити про альтернативне пояснення. Результати дослідження С. Шорхт та ін. довели, що систематичне використання методик Chain-of-Thought Prompting і Ask-me-Anything prompting суттєво покращувало математичну продуктивність моделі для алгебраїчних задач [32]. Якщо це вірно для самої моделі, то ймовірно, це вірно і для здобувача, який взаємодіє з нею, оскільки якість взаємодії залежить від якості питання.

Поза аудиторією, в позаурочній і самостійній роботі, адаптивні платформи демонструють один з найбільш документованих ефектів. Адаптивні навчальні платформи персоналізують досвід навчання в кількох вимірах одночасно: подають матеріал у зручному для студента форматі, рекомендують ресурси, забезпечують індивідуальний зворотний зв'язок і динамічно коригують рівень складності завдань відповідно до прогресу. Наприклад, можливості платформи ALEKS вивчалися в контексті планування занять із алгебри, де вони допомагали ліквідовувати індивідуальні прогалини знань на основі оцінювань у реальному часі [29]. Цю ідею можна розглянути через концепцію Bloom's «2-sigma problem». Здобувачі, яких навчав індивідуальний тьютор, показували результати на два стандартні відхилення вищі, ніж студенти в груповому форматі. Водночас адаптивні платформи прагнуть подолати цей розрив, пропонуючи персоналізований досвід у масштабі [33].

Формативне оцінювання є, мабуть, тією сферою, де ШІ допомагає найбільше. Теорія когнітивного навантаження знаходить відображення в дизайні ITS-систем через поступове ускладнення задач і покрокові підказки, що



мінімізують зайве когнітивне навантаження та направляють зусилля на значуще опрацювання матеріалу [34]. Для формативного оцінювання з вищої математики це особливо релевантно, оскільки здобувач, який припустився помилки в інтегруванні за частинами, потребує не просто «неправильно», він потребує вказівки на конкретний крок, де помилка виникла. П. Слободський, М. Дурчева та Л. Кугель продемонстрували здатність ChatGPT підтримувати мультимодальне залучення через системи підготовки до іспитів, хоча якість і точність такого зворотного зв'язку нерівномірна та суттєво залежить від типу задачі [35].

Можна припустити, що ефективним є не автономне ІІІ-оцінювання, а гібридна модель, де ІІІ опрацьовує рутинний зворотний зв'язок на першому рівні, тобто правильність відповіді чи типову помилку, а викладач зосереджується на зворотному зв'язку другого рівня – осмисленні стратегії, якості аргументації і концептуальному розумінні. Такий розподіл підтверджується дослідниками М. М. Са-ад та ін., які стверджують, що основна роль ІІІ в аудиторії полягає в автоматизації рутинних завдань і забезпеченні аналітику на основі даних, звільняючи викладача для роботи з критичним мисленням та розв'язанням задач вищого рівня [36].

Методичні підходи неможливо розглядати у відриві від готовності викладача. Фреймворк ТРАСК підкреслює, що ефективна інтеграція технологій у навчання вимагає синтезу трьох знань одночасно: знання змісту предмета, знання педагогічних стратегій і знання того, як саме технологія може підсилити процес навчання. Для вищої математики це означає, що викладач має не просто «підключити» ChatGPT до курсу, а методично продумати той етап вивчення, де адаптивна платформа доречна, а де її можливості є обмеженими. Так, С. Рен та М. Лунь Ву виокремили чотири ключові компетентності для інтеграції ІІІ у вищій освіті, серед яких є ІІІ-грамотність як інтелектуальна технологічна компетентність і ІІІ-підтримана інноваційна педагогіка [37]. Без цих



компетентностей будь-яка форма інтеграції залишається ситуативною, а не системною.

Врешті, жодна з описаних форм: ні лекція з ІІІ-підтримкою, ні адаптивний практикум, ні перевернутий клас, не є за замовчуванням кращою або гіршою. Інтеграція ІІІ в математичну освіту потребує збалансованого підходу, який враховує одночасно можливості та ризики. Надмірна когнітивна залежність від ІІІ, що була зафіксована у 40 % здобувачів, може призвести до помилок у виконанні завдань, послаблення здатності до самостійного прийняття рішень і критичного мислення [10]. Вибір підходу визначається специфікою розділу математики, рівнем підготовки здобувачів, наявним технологічним середовищем і, що критично, педагогічною концепцією викладача щодо того, яку роль у навчанні відіграє самостійне мислення та когнітивне зусилля.

Висновки. Проведений аналіз засвідчує, що дидактичний потенціал ІІІ-інструментів у викладанні вищої математики є реальним, але суттєво диференційованим залежно від розділу та форми навчальної діяльності. Найбільш обґрунтованою виглядає не моноінструментальна стратегія, а триада: генеративна модель для концептуального діалогу, спеціалізований математичний інструмент для верифікації обчислень та адаптивна платформа для систематичної практики. Водночас ризик когнітивної залежності здобувачів і нерівномірність якості зворотного зв'язку вимагають педагогічного супроводу, а не автономного впровадження. Формативне оцінювання залишається сферою, де ІІІ найбільш органічно доповнює, але не підміняє роботу викладача. Принципово важливим є те, що ефективна інтеграція зумовлена не наявністю інструменту, а рівнем ІІІ-грамотності педагога та методичною усвідомленістю вибору.

Суб'єктний вимір інтеграції ІІІ-інструментів у викладання вищої математики залишається найменш дослідженим аспектом проблеми. Зокрема, потребує окремого емпіричного вивчення питання готовності викладачів і



здобувачів до використання ІІІ в навчальному процесі з урахуванням їхніх установок, цифрової компетентності й усвідомлених бар'єрів впровадження. Перспективним є проведення анкетування учасників освітнього процесу в українських закладах вищої освіти, що дозволило б верифікувати теоретичні положення, обґрунтовані в цій статті.

Список використаних джерел

1. Левченко Д. Лише 15% українців використовують ChatGPT для навчання та роботи – опитування. URL: <https://gwaramedia.com/lishe-15-ukrainciv-vikoristovuyut-chatgpt-dlya-navchannya-ta-roboti-opituvannya/> (дата звернення: 31.03.2026).
2. Майже половина українців користується штучним інтелектом. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-society/4101218-majze-polovina-ukrainciv-koristuetsa-stucnim-intelektom.html> (дата звернення: 31.03.2026).
3. Андрощук А. Г., Малюга О. С. Використання штучного інтелекту у вищій освіті: стан і тенденції. *Міжнародний науковий журнал з освіти та лінгвістики*. 2024. Т. 3, № 2. С. 27–35. DOI: <https://doi.org/10.46299/j.isjel.20240302.04> (дата звернення: 31.03.2026).
4. Awang L. A., Yusop F. D., Danaee M. Current practices and future direction of artificial intelligence in mathematics education: A systematic review. *International Electronic Journal of Mathematics Education*. 2025. Vol. 20, no. 2. Article em0823. DOI: <https://doi.org/10.29333/iejme/16006> (дата звернення: 31.03.2026).
5. Wang J., Fan W. The effect of ChatGPT on students' learning performance, learning perception, and higher-order thinking: insights from a meta-analysis. *Humanities and Social Sciences Communications*. 2025. Vol. 12. Article 621. DOI: <https://doi.org/10.1057/s41599-025-04787-y> (дата звернення: 31.03.2026).



6. Msomi A. M., Mthethwa T. M. Artificial intelligence in higher education mathematics: A systematic review of trends, benefits, and challenges. *Proceedings of the Focus Conference (TFC 2024)*. 2024. P. 88–118. DOI: https://doi.org/10.2991/978-94-6463-630-7_6 (дата звернення: 31.03.2026).
7. Al-Zahrani A. M., Alasmari T. M. Exploring the impact of artificial intelligence on higher education: The dynamics of ethical, social, and educational implications. *Humanities and Social Sciences Communications*. 2024. Vol. 11. Article 912. <https://doi.org/10.1057/s41599-024-03432-4> (дата звернення: 31.03.2026).
8. Pepin B., Buchholtz N., Salinas-Hernández U. A scoping survey of ChatGPT in mathematics education. *Digital Experiences in Mathematics Education*. 2025. Vol. 11. P. 9–41. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40751-025-00172-1> (дата звернення: 31.03.2026).
9. Kaya D., Yavuz S. Can generative AI and ChatGPT break human supremacy in mathematics and reshape competence in cognitive-demanding problem-solving tasks? *Journal of Intelligence*. 2025. Vol. 13, no. 4. Article 43. DOI: <https://doi.org/10.3390/jintelligence13040043> (дата звернення: 31.03.2026).
10. Turmuzi M., Azmi S., Kertiyani N. M. I. ChatGPT in school mathematics education: A systematic review of opportunities, challenges, and pedagogical implications. *Teaching and Teacher Education*. 2026. Vol. 170. Article 105286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tate.2025.105286> (дата звернення: 31.03.2026).
11. Higher education students' perceptions of ChatGPT: A global study of early reactions / D. Ravšelj et al. *PLoS One*. 2025. Vol. 20, no. 2. Article e0315011. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0315011> (дата звернення: 31.03.2026).
12. Celik I. Towards Intelligent-TPACK: An empirical study on teachers' professional knowledge to ethically integrate artificial intelligence (AI)-based tools into education. *Computers in Human Behavior*. 2023. Vol. 138. Article 107468. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chb.2022.107468> (дата звернення: 31.03.2026).



13. Teachers' AI-TPACK: Exploring the relationship between knowledge elements / Y. Ning et al. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, no. 3. Article 978. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16030978> (дата звернення: 31.03.2026).
14. Uneven adoption of artificial intelligence tools among U.S. Teachers and principals in the 2023–2024 school year / J. H. Kaufman et al. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2025. 24 p. DOI: <https://doi.org/10.7249/RRA134-25> (дата звернення: 31.03.2026).
15. Міжнародне дослідження якості освіти показало її безпрецедентне падіння – і у нас, і у світі. URL: <https://zbruc.eu/node/117144> (дата звернення: 31.03.2026).
16. Стойка М., Петечук Ю. Використання штучного інтелекту при викладанні математики. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: «Педагогіка. Соціальна робота»*. 2025. № 2 (55). С. 104–110. DOI: <https://doi.org/10.24144/2524-0609.2024.55.104-110> (дата звернення: 31.03.2026).
17. Богатенкова О. Є. Обізнаність здобувачів освіти щодо математичних програм штучного інтелекту: аналіз та перспективи впровадження ШІ в освітній процес. *Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання в підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми*. 2025. №. 76. С. 9–18. DOI: <https://doi.org/10.31652/2412-1142-2025-76-9-18> (дата звернення: 31.03.2026).
18. Штучний інтелект в освітніх галузях (мовно-літературна та математична освітні галузі): навч.-метод. посіб. для здобувачів першого (бакалавр.), другого (магістер.) рівнів вищ. пед. освіти, наук.-пед. працівників закл. вищ. пед. освіти та пед. кадрів закл. заг. серед. освіти / [уклад.: Т. М. Собченко, С. О. Доценко, А. В. Боярська-Хоменко]. Харків : Харків. нац. пед. ун-т ім. Г. С. Сковороди, 2023. Ч. 1. 76 с. URL: <https://dspace.hnpu.edu.ua/items/e2c13b21-1471-4cd7-84ee-ac36e0455f6c> (дата звернення: 31.03.2026).



19. Pardos Z. A., Bhandari S. ChatGPT-generated help produces learning gains equivalent to human tutor-authored help on mathematics skills. *Plos One*. 2024. Vol. 19, no. 5. Article e0304013. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0304013> (дата звернення: 31.03.2026).
20. ChatGPT's performance in university admissions tests in mathematics / A. Udias et al. *International Electronic Journal of Mathematics Education*. 2024. Vol. 19, no. 4. Article em0795. DOI: <https://doi.org/10.29333/iejme/15517> (дата звернення: 31.03.2026).
21. Nicol E. Evaluating the effectiveness of ChatGPT in solving math problems across varying levels of difficulty and its implications on education. URL: <https://digitalshowcase.lynchburg.edu/utcp/335> (дата звернення: 31.03.2026).
22. Rigaud Téllez N., Rayón Villela P., Blanco Bautista R. Evaluating ChatGPT-generated linear algebra formative assessments. *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*. 2024. Vol. 8, no. 5. P. 75–82. DOI: <https://doi.org/10.9781/ijimai.2024.02.004> (дата звернення: 31.03.2026).
23. Students' use of generative artificial intelligence for proving mathematical statements / H. Yoon et al. *ZDM Mathematics Education*. 2024. Vol. 56. P. 1531–1551. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11858-024-01629-0> (дата звернення: 31.03.2026).
24. AI achieves silver-medal standard solving International Mathematical Olympiad problems. URL: <https://deepmind.google/blog/ai-solves-imo-problems-at-silver-medal-level/> (дата звернення: 31.03.2026).
25. New AI-powered tool helps students find creative solutions to complex math proofs. URL: <https://phys.org/news/2025-12-ai-powered-tool-students-creative.html> (дата звернення: 31.03.2026).
26. Nanda S. B., Pradhan D. K. Artificial Intelligence in mathematics education: A systematic review of global trends and emerging themes. *Journal of Mathematics, Science and Technology Education*. 2025. Vol. 2, no. 2. P. 153–175. DOI: <https://doi.org/10.12973/jmste.2.2.153> (дата звернення: 31.03.2026).



27. Kim Y. R., Park M. S., Joung E. Exploring the integration of artificial intelligence in math education: Preservice teachers' experiences and reflections on problem-posing activities with ChatGPT. *School Science and Mathematics*. 2026. Vol. 126, no. 1. P. 9–23. DOI: <https://doi.org/10.1111/ssm.18336> (дата звернення: 31.03.2026).

28. A systematic review of AI-driven intelligent tutoring systems (ITS) in K-12 education / A. Létourneau et al. *Npj Science of Learning*. 2025. Vol. 10, no. 1. Article 29. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41539-025-00320-7> (дата звернення: 31.03.2026).

29. Artificial intelligence interventions in mathematics education: A systematic literature review / K. Holman et al. *Insights into Learning Disabilities*. 2025. Vol. 22, no. 1. P. 65–91. URL: <https://eric.ed.gov/?id=EJ1481890> (дата звернення: 31.03.2026).

30. Solving the self-regulated learning problem: Exploring the performance of ChatGPT in mathematics / P. H. Li et al. *Innovative Technologies and Learning (ICITL 2023)*. Cham: Springer, 2023. P. 77–86. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-40113-8_8 (дата звернення: 31.03.2026).

31. Promoting self-regulation progress and knowledge construction in blended learning via ChatGPT-based learning aid / T. T. Wu et al.. *Journal of Educational Computing Research*. 2024. Vol. 61, no. 8. P. 1539–1567. DOI: <https://doi.org/10.1177/07356331231191125> (дата звернення: 31.03.2026).

32. Schorcht S., Buchholtz N., Baumanns L. Prompt the problem – investigating the mathematics educational quality of AI-supported problem solving by comparing prompt techniques. *Frontiers in Education*. 2024. No. 9. Article 1386075. DOI: <https://doi.org/10.3389/feduc.2024.1386075> (дата звернення: 31.03.2026).

33. Tan L. Y., Hu S., Yeo D. J. Artificial intelligence-enabled adaptive learning platforms: A review. *Computers and Education: Artificial Intelligence*. 2025. Vol. 9.



Article 100429. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2025.100429> (дата звернення: 31.03.2026).

34. Zerkouk M., Mihoubi M., Chikhaoui B. A comprehensive review of AI-based intelligent tutoring systems: applications and challenges. *arXiv*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.18882> (дата звернення: 31.03.2026).

35. Slobodsky Ph., Durcheva M., Kugel L. If you can't beat it, join it! Teaching and learning mathematics with ChatGPT and key prompts to stimulate self-learning. *Athens Journal of Education*. 2025. Vol. 12. P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.30958/aje.X-Y-Z> (дата звернення: 31.03.2026).

36. Automated administrative tasks in education / M. Sa-ad et al. *Unlocking the Potential: Artificial Intelligence in Education*. Deep Science Publishing, 2025. P. 31–45. URL: https://doi.org/10.70593/978-93-49307-53-7_3 (дата звернення: 31.03.2026).

37. Ren X., Wu M. L. Examining teaching competencies and challenges while integrating artificial intelligence in higher education. *TechTrends*. 2025. Vol. 69. P. 519–538. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11528-025-01055-3> (дата звернення: 31.03.2026).