

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-365-66>
УДК 004.8:004.93:371.39

КОЛОДІЙ РОМАН

Національний університет «Львівська політехніка»
<https://orcid.org/0009-0002-4628-6422>
e-mail: roman.i.kolodii@lpnu.ua

ВИКЛЮК ЯРОСЛАВ

Національний університет «Львівська політехніка»
<https://orcid.org/0000-0003-4766-4659>
e-mail: yaroslav.i.vykliuk@lpnu.ua

ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ВІРТУАЛЬНИХ НАВЧАЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ ЗА ДОПОМОГОЮ АГЕНТІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ: СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ, МЕТОДИ ТА ВИКЛИКИ

У статті здійснено систематизований аналіз сучасних підходів до інтелектуалізації віртуальних навчальних середовищ (ВНС) на основі взаємодії агентів штучного інтелекту (ШІ). Метою дослідження є узагальнення методів побудови агентних компонентів ВНС та виявлення практичних обмежень і дослідницьких прогалин, що стримують масштабування персоналізованого навчання. Огляд виконано за публікаціями з провідних наукометричних і цифрових бібліотек (Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, ACM Digital Library, Google Scholar) із фокусом на моделях взаємодії «агент–студент», «агент–агент» та «агент–викладач/адміністратор». Розглянуто класичні методи машинного навчання для рекомендацій і прогнозування навчальної успішності (kNN, SVM, Naïve Bayes), алгоритми кластеризації поведінкових патернів (DBSCAN), а також підходи до формування та оптимізації індивідуальних навчальних траєкторій. Особливо проаналізовано інструменти діалогової підтримки (чат-боти), навчання з підкріпленням (RL) для адаптивного вибору педагогічних інтервенцій та великі мовні моделі (ВММ) як ядро генеративних агентів. Визначено ключові ризики застосування генеративних агентів у ВНС: непрозорість рішень, «галюцинації», домінні упередження та витік конфіденційних освітніх даних. Показано, що інтеграція пояснюваного ШІ (ХАІ) підвищує довіру користувачів і керуваність навчального процесу. Наголошено на необхідності впровадження етичних принципів і процедур контролю якості відповідей ВММ. Результати огляду вказують на перспективність мультиагентних архітектур, де ролі агентів розділяються за функціями, а взаємодія оптимізується через спільні протоколи обміну знаннями та метрики ефективності.

Ключові слова: штучний інтелект, віртуальні навчальні середовища, агенти ШІ, адаптивне навчання, великі мовні моделі, мультиагентні системи.

KOLODII ROMAN, VYKLIUK YAROSLAV

Lviv Polytechnic National University

INTELLECTUALIZING VIRTUAL LEARNING ENVIRONMENTS WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE AGENTS: CURRENT TRENDS, METHODS AND CHALLENGES

The paper provides a structured review of current approaches to intelligent virtual learning environments (VLEs) based on the interaction of artificial intelligence (AI) agents. The aim of the study is to summarize methods for designing agent-based components of VLEs and to identify practical limitations and research gaps that hinder the scalable deployment of personalized learning. The review is based on publications indexed in leading bibliographic and digital libraries (Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, ACM Digital Library, Google Scholar) with emphasis on interaction models agent-student, agent-agent, and agent-instructor/administrator. The paper discusses classical machine learning techniques used for recommendations and learning outcome prediction (k-nearest neighbors, kNN; support vector machines, SVM; Naive Bayes), clustering algorithms for behavioral pattern discovery (DBSCAN), and approaches to building and optimizing individual learning pathways. In addition, conversational support tools (chatbots), reinforcement learning (RL) for adaptive selection of pedagogical interventions, and large language models (LLMs) as the core of generative agents (tutors, facilitators, and assessment assistants) are analyzed. The analysis highlights key risks that arise when VLEs adopt generative agents: limited transparency of decisions, hallucinations, domain-specific biases, and potential leakage of sensitive educational data. The study argues that integrating explainable AI (XAI) - in particular, local explanations for recommendations, justified assessment decisions, and traceability of agents' reasoning - improves user trust and the controllability of the learning process. The paper also emphasizes the need to embed ethical principles (privacy, fairness, safety, academic integrity) and quality assurance procedures for LLM outputs (fact-checking, context constraints, and citation policies). The review highlights the potential of multi-agent architectures in which agent roles are separated by function (knowledge diagnosis, personalization, feedback generation, moderation) and interaction is optimized via shared knowledge-exchange protocols and performance metrics. The practical contribution of the paper is a set of recommendations for selecting VLE intelligence methods according to learning goals and transparency requirements, as well as outlining directions for further research on bias mitigation and increasing the reliability of generative agents.

Keywords: artificial intelligence, virtual learning environments, AI agents, adaptive learning, large language models, multi-agent systems.

Стаття надійшла до редакції / Received 19.03.2026
Прийнята до друку / Accepted 17.04.2026
Опубліковано / Published 28.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Колодій Роман, Виклюк Ярослав

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сьогодні ми є свідками глибокої трансформації освітніх процесів, де інформаційні технології, а особливо штучний інтелект, відіграють ключову роль. Інтеграція ШІ, зокрема агентів, у віртуальні навчальні середовища відкриває нові перспективи для персоналізації навчання, що підтверджується у роботі Х. Муніра, Б. Фогеля та А. Якобссона [1], де проаналізовано вплив адаптивного формування навчальних траєкторій, автоматизованого

оцінювання та рекомендаційного супроводу студентів. Ці підходи змінюють традиційні уявлення про роль викладача та модель освітнього процесу загалом.

Проте, поряд зі значними здобутками, постають нові виклики, які потребують уваги дослідників. Зокрема, у праці Ш. Ванга, Ф. Ванга, Ч. Вана та ін. [2] автори підкреслюють, що особливо важливим є питання прозорості рішень (XAI), які приймаються агентами ШІ, а також подолання «галюцинацій» та упереджень, які можуть виникати у великих мовних моделях. Для того, щоб інтелектуалізовані ВНС були по-справжньому ефективними, необхідно розробити комплексні методології та алгоритми взаємодії агентів ШІ, що гарантуватимуть адаптивне навчання й неупередженість їхніх дій.

Використання агентів ШІ у ВНС виходить далеко за межі простої автоматизації. Воно охоплює фундаментальні аспекти освіти: від розробки навчальних матеріалів до організації взаємодії між учасниками освітнього процесу та оцінювання результатів. Агенти ШІ можуть виступати в ролі персональних тьюторів, створюючи індивідуалізовані напрямки навчання, аналізуючи успішність студентів і надаючи своєчасні рекомендації. Водночас, за даними досліджень Ш. Ванга та ін. [2], широке впровадження таких систем загострює потребу у прозорості алгоритмів і рішень. Користувачі повинні бути впевнені, що рекомендації агента є обґрунтованими та прозорими.

Забезпечення прозорості агентів ШІ вимагає інтеграції підходів пояснюваного штучного інтелекту (XAI), які дають змогу «розкрити» логіку та обґрунтованість рекомендацій. Відсутність такої прозорості може призвести до недовіри й відторгнення нових технологій. Ще одним критичним викликом є мінімізація «галюцинацій» і упереджень у ВММ. Ці явища можуть спотворювати навчальний контент або формувати хибні висновки. Подолання цих проблем потребує комплексних рішень, що охоплюють як технічний бік (архітектура алгоритмів, методи навчання тощо), так і педагогічні аспекти (методологія впровадження та оцінювання ефективності).

Таким чином, вдосконалення взаємодії агентів штучного інтелекту у ВНС є актуальною й важливою науково-практичною задачею, яка вимагає подальшого дослідження. Зокрема, пошук способів мінімізувати негативні прояви, як-от упередження та «галюцинації», одночасно максимізуючи позитивний вплив ШІ на навчальний процес, становить значний науковий інтерес і має практичну цінність для розвитку сучасних освітніх технологій.

Аналіз досліджень та публікацій

З метою визначення найбільш релевантних публікацій було використано фахові наукометричні бази даних і відкриті онлайн-репозиторії. Як основні джерела були обрані Scopus і Web of Science, що дають змогу охопити рецензовані статті з авторитетних наукових журналів і збірників конференцій. Для розширення пошуку та включення спеціалізованих розробок з інформатики, інженерії, інформаційних технологій та споріднених дисциплін додатково використовувалися IEEE Xplore і ACM Digital Library. Крім того, аби врахувати публікації у відкритому доступі було залучено Google Scholar.

Відбір джерел відбувався на основі чітко сформованих критеріїв. Спершу було оцінено релевантність досліджень до ключових концептів - «агенти ШІ», «віртуальні навчальні середовища», «адаптивне навчання», «Explainable AI», «галюцинації в LLM», «упередження у великих мовних моделях». Також було враховано період публікацій (2018-2024 роки), аби зберегти актуальність матеріалів. Серед пріоритетних джерел були як рецензовані статті, що здобули значне цитування чи викликали жваві дискусії в науковому співтоваристві.

Процес відбору передбачав три основні стадії: пошук, скринінг і оцінка відповідності. Спочатку за допомогою ключових слів і цільових пошукових запитів було сформовано перелік із понад 100 публікацій. На етапі скринінгу проводився детальний аналіз анотацій та підсумкових висновків, що дало змогу відсіяти нерелевантні роботи. У підсумку, дотримуючись визначених критеріїв, для наступного детального розгляду було обрано близько 30 публікацій.

Формулювання цілей статті

Метою цього огляду є оцінка сучасного стану досліджень у сфері інтелектуалізації ВНС. Ключовим завданням є визначення основних підходів до організації взаємодії агентів ШІ, а також ідентифікація методів, що сприяють забезпеченню прозорості рішень і мінімізації упередженостей у ВММ. Результати огляду допоможуть глибше зрозуміти сучасні підходи до застосування агентів ШІ у ВНС, а також стануть підґрунтям для подальшої розробки нових підходів і методів, спрямованих на підвищення ефективності та прозорості цих важливих освітніх технологій.

Виклад основного матеріалу

Концептуальні засади використання штучного інтелекту в освіті

Штучний інтелект (ШІ) здатний імітувати і навіть розширювати пізнавальні функції людини, такі як навчання, ухвалення рішень та прогнозування. Як зазначають Х. Мунір, Б. Фогель та А. Якобссон [1], застосування алгоритмів машинного й глибинного навчання дає змогу системам на основі ШІ обробляти великі обсяги даних та виявляти приховані закономірності у навчальному середовищі. У межах освітнього процесу це дає змогу пропонувати максимально точні і своєчасні рекомендації студентам та викладачам.

Напрямок Artificial Intelligence in Education (AIED) розглядається як міждисциплінарна сфера, що інтегрує досягнення інформатики, психології, педагогіки й когнітивних наук [2]. Мета AIED полягає у створенні інтелектуальних програмних систем, здатних адаптувати навчальний контент, оцінювати прогрес учнів та пропонувати індивідуальні стратегії навчання. Важливо наголосити, що AIED є лише одним зі складників більш

широкого поняття «цифрова освіта» (Digital Education), яка охоплює широкий спектр технологій: від інтерактивних освітніх платформ і систем управління навчанням (LMS) до використання електронних підручників та онлайн-курсів (МООС). Проте, за даними Ш. Ванга і співавт. [2], специфіка AIEd полягає в акценті на інтелектуалізації, тобто на застосуванні систем, здатних до самонавчання й адаптації до конкретних умов.

Зважаючи на вищезазначене, саме на перетині AI, AIEd та Digital Education народжуються нові освітні моделі, де віртуальні навчальні середовища стають все більш адаптивними й інтерактивними. Як наголошують Т.К.Ф. Чіу у співавт. [3], глибше розуміння цих понять закладає основу для розроблення персоналізованих методів, а також для впровадження механізмів пояснюваності (XAI) й розв'язання таких викликів, як «галюцинації» у великих мовних моделях.

Як засвідчує історичний огляд, викладений у роботі Т.К.Ф. Чіу та ін. [3], розвиток AIEd розпочався ще у 1970-х роках, коли з'явилися перші інтелектуальні тьюторські системи (ITS). Тодішні системи мали досить обмежену базу знань і могли лише реагувати на певні запити у форматі вибору варіантів відповідей. Проте вже тоді сформувався ключовий принцип AIEd - надання учневі персоналізованої підтримки, яка враховувала його індивідуальний профіль. Наступний потужний поштовх у розвитку відбувся у 1990-х-2000-х роках, коли швидкий прогрес у машинному навчанні та глибинному навчанні (Deep Learning) дозволив системам обробляти великі обсяги різноманітних даних і значно точніше прогнозувати навчальні результати студента. За словами Ш. Ванга й співавт. [2], це особливо характерно для сучасних МООС-платформ, де алгоритми ШІ аналізують діяльність тисяч користувачів, оптимізуючи навчальні матеріали та пропонуючи індивідуальні завдання.

Поняття «інтелектуалізація віртуальних навчальних середовищ» часто розглядають як впровадження в освітній процес програм і сервісів на основі ШІ, здатних виконувати завдання, що раніше вимагали значних зусиль викладачів чи адміністраторів. Спочатку увага зосереджувалася на адаптивних системах, які автоматично коригували навчальний контент залежно від успішності студента. Проте, як відзначає Х. Мунір та колеги [1], сучасні платформи вийшли за межі такої парадигми: нині вони можуть відстежувати рівень залученості користувачів, надавати тьюторську підтримку, аналізувати поведінку студентів і прогнозувати їхні майбутні освітні потреби чи виявляти прогалини в знаннях.

У центрі таких середовищ дедалі частіше постають агенти ШІ, які відіграють роль «цифрових помічників» або «медіаторів» між користувачем і навчальним контентом. Згідно з дослідженнями [1; 2], вони не лише спрощують адаптацію матеріалів та автоматизують рутинні завдання (перевірку тестів, планування розкладу, рекомендації щодо ресурсів), а й стають самостійними учасниками освітнього процесу, які взаємодіють з викладачами для досягнення вищої якості навчальних результатів.

Зі зростанням можливостей ШІ відбулися й суттєві зміни у проектуванні інтелектуалізованих платформ. Ранні адаптивні рішення, які зазвичай налаштовували складність завдань переважно за результатами тестів, нині перетворилися на багатофункціональні платформи з кількома видами агентів. Один із них може оцінювати ймовірність успішного складання іспитів, інший пропонувати додаткові матеріали чи літературу, а ще один надавати мовну чи математичну підтримку в режимі реального часу. Як вказують Т.К.Ф. Чіу та ін. [3], значна роль тут належить машинному й глибинному навчанню, здатним розпізнавати складні патерни у великих масивах освітніх даних і налаштовуватися до індивідуальних характеристик кожного студента.

Додатковим поштовхом до розширення таких систем стали хмарні обчислення, що надали можливість масштабувати платформи до рівня обслуговування мільйонів користувачів одночасно. Це сприяло формуванню інструментів і платформ: від спеціалізованих програмних рішень (наприклад, інтерактивних тьюторів з іноземних мов) до універсальних LMS із вбудованими модулями штучного інтелекту. На думку Ш. Ванга й співавт. [2], такі зміни суттєво вплинули на ефективність та якість освітнього процесу.

Методи та підходи до організації взаємодії агентів ШІ у ВНС

Аналіз наукових джерел свідчить, що різні системні архітектури - від мультиагентних платформ до більш централізованих рішень - суттєво впливають на ефективність використання агентів штучного інтелекту і визначають рівень їхньої здатності гнучко реагувати на індивідуальні потреби користувачів. Зокрема, у дослідженнях [5; 7] наголошується на перевагах мультиагентних систем (МАС) для розподіленого керування освітніми процесами, тоді як у роботах [7] описано архітектури з «центральною» агентом, що координує роботу інших підсистем.

У багатьох працях (наприклад, [10; 11]) автори звертають увагу, що ШІ в навчальних системах уже вийшов за рамки простих підказок чи адаптивного налаштування контенту. Сьогодні дедалі частіше застосовують алгоритми, розроблені спеціально для аналізу поведінки студентів, їхньої успішності й потенційних проблемних ділянок у реальному часі. Зокрема, популярним став метод DBSCAN [5; 7], який допомагає формувати групи учнів із подібними характеристиками, стилями навчання чи прогалинами в знаннях.

Іншим напрямом досліджень є побудова лінійних траєкторій навчання на основі освітніх концептуальних мап. У працях [7; 11] підкреслюється, що ці алгоритми можуть послідовно організовувати зміст курсу для кожного студента, враховуючи його поточний рівень підготовки й конкретні цілі.

Особливу увагу у багатьох роботах авторами [15-17] приділено чат-ботам та розмовним системам, які можуть діяти як віртуальні тьютори, «співучні» колеги або адміністративні помічники. Такі агенти не лише спрощують комунікацію між студентом і платформою, а й дають змогу залучити ШІ до індивідуальних консультацій, пояснювальних сесій чи навіть до групового виконання завдань.

У дослідженнях, присвячених машинному навчанню та аналізу освітніх даних [7-8], фігурує широкий спектр методів - від методу k найближчих сусідів (KNN) і методу опорних векторів (SVM) до наївного Байєса (Naive Bayes) та ансамблевих технік (наприклад, Random Forest, AdaBoost). Автори цих робіт наголошують, що такі підходи дають змогу ефективно визначати ризики відсіву, прогнозувати навчальні результати та пропонувати персональні рекомендації.

Ще одним напрямком, на якому акцентують увагу дослідники, є навчання з підкріпленням (RL) [9], зокрема Q-навчання та глибинні Q-мережі. У контексті освіти такі методи можуть динамічно змінювати складність і структуру навчального процесу, пропонуючи відповідні завдання або матеріали на основі дій і результатів студента.

Із впровадженням розширених моделей мовлення, зокрема BMM, з'явилися нові можливості для створення гнучких агентів, здатних не тільки відповідати на запитання, а й генерувати навчальні тексти, тести або розгорнуті пояснення. Проте, водночас такі моделі можуть демонструвати так звані «галюцинації» й відтворювати упередження, успадковані від тренувальних вибірок.

Для підвищення прозорості моделей і зростання довіри користувачів дедалі частіше застосовують підходи ХАІ, адаптовані до освітньої сфери. Мета полягає в тому, щоб агент ШІ не тільки давав рекомендації, а й пояснював, на основі яких факторів чи даних було прийнято відповідне рішення.

Важливою темою залишаються можливості інтегрування мультиагентних систем у комплексні архітектури ВНС, де разом із глибинними моделями використовуються символні алгоритми, а також елементи «нейро-символьного» навчання.

Таблиця 1

Огляд методів та підходів до взаємодії агентів ШІ у ВНС

Метод / Підхід	Опис	Типові застосування	Переваги / Виклики
DBSCAN	Некерований алгоритм кластеризації, який виділяє згрупування даних на основі щільності.	Виявлення груп студентів зі схожими поведінковими або освітніми характеристиками.	Дає змогу працювати зі складними наборами даних. Складність налаштування параметрів.
Лінійні алгоритми	Алгоритми, що формують послідовні «навчальні шляхи», враховуючи існуючі освітні концептуальні мапи.	Побудова індивідуальних «траєкторій» подачі матеріалів: від простих до складних тем.	Підвищують послідовність навчання. Можуть недооцінювати нетипові траєкторії.
Чат-боти та розмовні агенти	Програмні модулі з підтримкою NLP, які імітують розмову з людиною.	Тьютори, «співучні» для групового розв'язання завдань; адміністративна підтримка.	Зручність зворотного зв'язку. Виклики з якістю NLP та «галюцинаціями».
KNN, SVM, Naive Bayes	Класичні методи машинного навчання для класифікації та регресії освітніх даних.	Прогнозування ризиків відсіву, персональні рекомендації.	Гарна інтерпретованість. Обмежена ефективність на великих даних.
RL (Q-Learning, DQN, MARL)	Алгоритми навчання з підкріпленням, де агент максимізує «винагороду».	Оптимізація траєкторій навчання, динамічне регулювання складності завдань.	Гнучкість і динамічність. Потребує великого обсягу даних.
Великі мовні моделі (BMM)	Моделі на основі трансформерів для генерації текстового контенту.	Генерація матеріалів, тестів, автоматичне оцінювання, віртуальний тьютор.	Розширюють варіанти контенту. Ризики «галюцинацій» та упередженостей.
Пояснюваний ШІ (ХАІ)	Методи для прозорого обґрунтування рішень агентів ШІ.	Пояснюваність рішень, контроль якості, допомога викладачам.	Сприяє довірі до ШІ. Може ускладнювати модель.

Таким чином, сучасні підходи й алгоритми взаємодії агентів ШІ у віртуальних навчальних середовищах постають у вигляді розгалуженої екосистеми технологій - від кластеризації та лінійного впорядкування контенту до мультиагентних платформ і «розумних» чат-ботів, від традиційного машинного навчання до новітніх методів навчання з підкріпленням та використання великих мовних моделей.

Перспективи розвитку та виклики впровадження агентів ШІ у ВНС

Перспективи розвитку агентів ШІ у ВНС більшою мірою визначаються здатністю нових архітектур адаптуватися до складних динамічних потреб освіти. Як зазначає Н. Ш. Алотайбі [22], інтеграція ШІ з існуючими системами управління навчанням (LMS) може суттєво розширити можливості персоналізації та автоматизації.

Чимало дослідників наголошують, що використання трансформерів і гібридних когнітивних моделей може значно розширити функціонал адаптивних систем [7; 8]. У такому контексті зростає інтерес до мультиагентних підходів.

Розглядаючи більш загальну еволюцію від централізованих до розподілених систем, автори відзначають, що впровадження мультиагентних архітектур може сприяти як кращій масштабованості, так і більшій гнучкості у налаштуванні освітніх технологій.

Однак разом із цими перспективами дослідження вказують на важливі виклики. По-перше, захист приватності користувачів набуває особливої актуальності. По-друге, питання рівності доступу до технологій стає

дедалі гострішим. Як зауважує Алоатабі [22], потреба у відповідальному використанні даних і забезпеченні справедливого доступу до ШІ є частиною глобальної освітньої політики.

Супутнім аспектом залишаються етичні дилеми, пов'язані з імовірними упередженнями в алгоритмах. За словами Раес М. та співавт. [29], це може впливати на рекомендації або обрання навчальних завдань.

Щодо рекомендацій для подальших досліджень, більшість авторів сходиться на тому, що потрібне комплексне вивчення технічних, педагогічних і соціально-етичних аспектів водночас.

У контексті підвищення ефективності, прозорості та мінімізації упередженостей одним із перспективних шляхів стає розроблення моделей Explainable Reinforcement Learning або мультиагентних систем із «вбудованою» пояснюваністю.

Дискусія

Аналіз наукових джерел, присвячених інтелектуалізації віртуальних навчальних середовищ за допомогою агентів ШІ, свідчить про помітний прогрес у цій сфері. Водночас, він підкреслює ряд завдань, які потребують подальшого вивчення й розв'язання.

На початковому етапі огляд концептуальних засад продемонстрував, що дослідження штучного інтелекту в освіті (AIED) розвивається на перетині інформатики, педагогіки, психології та когнітивних наук. Історичний екскурс дав змогу простежити еволюцію від ранніх інтелектуальних тьюторських систем (ITS) до сучасних адаптивних платформ.

Подальший розгляд перспектив розвитку та викликів впровадження агентів ШІ у ВНС демонструє, що майбутнє інтелектуалізованих систем навчання залежить від здатності дослідників і розробників долати технологічні, етичні та соціальні перешкоди.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У цьому дослідженні було здійснено ґрунтовний аналіз літератури щодо застосування агентів штучного інтелекту у віртуальних навчальних середовищах, де особливу увагу приділено порівнянню сучасних алгоритмів та інструментів із попередніми інтелектуальними тьюторськими системами.

Дослідження різних методів взаємодії агентів штучного інтелекту виявило, що використання алгоритмів кластеризації, лінійних і багатовимірних траєкторій, а також великих мовних моделей значно розширює можливості порівняно з попередніми підходами.

Крім того, було досліджено перспективи впровадження трансформерів, гібридних когнітивних моделей та мультиагентних архітектур.

Завдяки цим висновкам було виокремлено кілька ключових напрямів розвитку ВНС на основі ШІ, зокрема детальну персоналізацію, мультиагентність, інтеграцію ВММ, прозорість та пояснюваність, а також урахування етичних і соціальних аспектів.

Література

1. Munir H., Vogel B., Jacobsson A. Artificial Intelligence and Machine Learning Approaches in Digital Education: A Systematic Review // Information. – 2022. – Vol. 13, Iss. 4. – P. 203. – DOI: <https://doi.org/10.3390/info13040203>.
2. Wang S., Wang F., Zhu Z. [та ін.]. Artificial intelligence in education: A systematic literature review // Expert Systems with Applications. – 2024. – Vol. 252, Iss. 4. – P. 124167. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124167>.
3. Chiu T. K. F., Xia Q., Zhou X. [та ін.]. Systematic literature review on opportunities, challenges, and future research recommendations of artificial intelligence in education // Computers and Education: Artificial Intelligence. – 2023. – Vol. 4. – P. 100118. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2022.100118>.
4. Strug B., Ślusarczyk G. A Multi-Agent System in Education Facility Design // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, Iss. 19. – P. 10878. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app131910878>.
5. Nazir M. Students' Performance Prediction in Higher Education Using Multi-Agent Framework-Based Distributed Data Mining Approach: A Review // International Journal of Virtual and Personal Learning Environments (IJVPLE). – 2023. – Vol. 13, Iss. 1. – P. 1–19. – DOI: <https://doi.org/10.4018/IJVPLE.328772>.
6. Durante Z., Sarkar B., Gong R. [та ін.]. An Interactive Agent Foundation Model // arXiv.org. – 2024. – URL: <https://arxiv.org/abs/2402.05929>. – DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.05929>.
7. Ivanova T. A multi-agent architecture for learning paths-based personalized e-learning systems // International Journal on Information Technologies and Security. – 2023. – Vol. 15, Iss. 4. – P. 49–60. – DOI: <https://doi.org/10.59035/OEZA3869>.
8. Sajja R., Sermet Y., Cikmaz M. [та ін.]. Artificial Intelligence-Enabled Intelligent Assistant for Personalized and Adaptive Learning in Higher Education // Information. – 2024. – Vol. 15, Iss. 10. – P. 596. – DOI: <https://doi.org/10.3390/info15100596>.
9. Усачов В., Тітов Г. Методи структуризації та персоналізації контенту в системах дистанційного навчання на основі автоматно-графової моделі // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2025. Т. 357, № 5.2. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-80>
10. Chen J., Lu X., Rejtig M. [та ін.]. Learning Agent-based Modeling with LLM Companions: Experiences of Novices and Experts Using ChatGPT & NetLogo Chat // Proceedings of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. – 2024. – P. 1–18. – DOI: <https://doi.org/10.1145/3613904.3642377>.

11. Gligorea I., Cioca M., Oancea R. [та ін.]. Adaptive Learning Using Artificial Intelligence in e-Learning: A Literature Review // Education Sciences. – 2023. – Vol. 13, Iss. 12. – P. 1216. – DOI: <https://doi.org/10.3390/educsci13121216>.
12. Nagahisarchoghaei M., Nur N., Cummins L. [та ін.]. An Empirical Survey on Explainable AI Technologies: Recent Trends, Use-Cases, and Categories from Technical and Application Perspectives // Electronics. – 2023. – Vol. 12, Iss. 5. – P. 1092. – DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12051092>.
13. Hamida S. U., Chowdhury M. J. M., Chakraborty N. R. [та ін.]. Exploring the Landscape of Explainable Artificial Intelligence (XAI): A Systematic Review of Techniques and Applications // Sustainability. – 2023. – Vol. 8, Iss. 11. – P. 149. – DOI: <https://doi.org/10.3390/bdce8110149>.
14. Guleria P., Sood M. Explainable AI and machine learning: performance evaluation and explainability of classifiers on educational data mining inspired career counseling // Education and Information Technologies. – 2022. – Vol. 28, Iss. 1. – P. 1081–1116. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11221-2>.
15. Alsafari B., Atwell E., Walker A., Callaghan M. Towards effective teaching assistants: From intent-based chatbots to LLM-powered teaching assistants // Natural Language Processing Journal. – 2024. – Vol. 8. – P. 100101.
16. Kuhail M. A., Alturki N., Alramlawi S., Alhejori K. Interacting with educational chatbots: A systematic review // Education and Information Technologies. – 2023. – Vol. 28, Iss. 1. – P. 973–1018.
17. Chang D. H., Lin M. P.-C., Hajian S., Wang Q. Q. Educational Design Principles of Using AI Chatbot That Supports Self-Regulated Learning in Education: Goal Setting, Feedback, and Personalization // Sustainability. – 2023. – Vol. 15, Iss. 17. – P. 12921. – DOI: <https://doi.org/10.3390/su151712921>.
18. Mustfa M. J., Ashiq S. Harnessing the Power of Artificial Intelligence for Adaptive Learning Systems: A Systematic Review // International Journal of Education and Management Engineering (IJEME). – 2024. – Vol. 14, Iss. 5. – P. 12–22. – DOI: <https://doi.org/10.5815/ijeme.2024.05.02>.
19. Jin H., Lee S., Shin H., Kim J. Teach AI How to Code: Using Large Language Models as Teachable Agents for Programming Education // Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. – Нью-Йорк, США : ACM Press, 2024. – P. 1–28. – DOI: <https://doi.org/10.1145/3613904.3642349>.
20. Jin S.-H., Im K., Yoo M. [та ін.]. Supporting students' self-regulated learning in online learning using artificial intelligence applications // International Journal of Educational Technology in Higher Education. – 2023. – Vol. 20, Iss. 1. – P. 37. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s41239-023-00406-5>.
21. Lin M. P.-C., Chang D. H., Winne P. H. A proposed methodology for investigating student-chatbot interaction patterns in giving peer feedback // Educational Technology Research and Development. – 2024. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11423-024-10408-3>.
22. Alotaibi N. S. The Impact of AI and LMS Integration on the Future of Higher Education: Opportunities, Challenges, and Strategies for Transformation // Sustainability. – 2024. – Vol. 16, Iss. 23. – P. 10357. – DOI: <https://doi.org/10.3390/su162310357>.
23. Yan L., Greiff S., Teuber Z., Gašević D. Promises and challenges of generative artificial intelligence for human learning // Nature Human Behaviour. – 2024. – Vol. 8, Iss. 10. – P. 1839–1850. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41562-024-02004-5>.
24. Mehrotra S. [та ін.]. Integrity based explanations for fostering appropriate trust in AI agents // ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems. – 2023. – DOI: <https://doi.org/10.1145/3610578>.
25. Susnjak T. Beyond predictive learning analytics modelling and onto explainable artificial intelligence with prescriptive analytics and ChatGPT // International Journal of Artificial Intelligence in Education. – 2023. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s40593-023-00336-3>.
26. Yan L. [та ін.]. Practical and ethical challenges of large language models in education: a systematic scoping review // British Journal of Educational Technology. – 2023. – DOI: <https://doi.org/10.1111/bjet.13370>.
27. Pinto A. S. [та ін.]. How machine learning (ML) is transforming higher education: a systematic literature review // Journal of information systems engineering and management. – 2023. – Vol. 8, Iss. 2. – P. 21168. – DOI: <https://doi.org/10.55267/iadt.07.13227>.
28. Chawla C. [та ін.]. Agentic AI: The building blocks of sophisticated AI business applications // Journal of AI, robotics & workplace automation. – 2024. – Vol. 3, Iss. 3. – P. 1. – URL: <https://doi.org/10.69554/xehz1946>.
29. Raees M. [та ін.]. From explainable to interactive AI: A literature review on current trends in human-AI interaction // International journal of human-computer studies. – 2024. – P. 103301. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2024.103301>.
30. Dwivedi R. [та ін.]. Explainable AI (XAI): core ideas, techniques and solutions // ACM computing surveys. – 2022. – URL: <https://doi.org/10.1145/3561048>.
31. Petrenko A., Vokhranov I. Neural networks: studying their decision-making rules // System research and information technologies. – 2023. – Iss. 2. – P. 74–85. – URL: <https://doi.org/10.20535/srit.2308-8893.2023.2.06>.
32. Bazdyrev A. Semi-supervised inverted file index approach for approximate nearest neighbor search // System research and information technologies. – 2023. – Iss. 4. – P. 69–75. – URL: <https://doi.org/10.20535/srit.2308-8893.2023.4.05>.

References

1. Munir H., Vogel B., Jacobsson A. Artificial Intelligence and Machine Learning Approaches in Digital Education: A Systematic Revision // *Information*. – 2022. – Vol. 13, Iss. 4. – P. 203. – DOI: <https://doi.org/10.3390/info13040203>.
2. Wang S., Wang F., Zhu Z. [et al.]. Artificial intelligence in education: A systematic literature review // *Expert Systems with Applications*. – 2024. – Vol. 252, Iss. 4. – P. 124167. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124167>.
3. Chiu T. K. F., Xia Q., Zhou X. [et al.]. Systematic literature review on opportunities, challenges, and future research recommendations of artificial intelligence in education // *Computers and Education: Artificial Intelligence*. – 2023. – Vol. 4. – P. 100118. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2022.100118>.
4. Strug B., Ślusarczyk G. A Multi-Agent System in Education Facility Design // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, Iss. 19. – P. 10878. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app131910878>.
5. Nazir M. Students' Performance Prediction in Higher Education Using Multi-Agent Framework-Based Distributed Data Mining Approach: A Review // *International Journal of Virtual and Personal Learning Environments (IJVPLE)*. – 2023. – Vol. 13, Iss. 1. – P. 1–19. – DOI: <https://doi.org/10.4018/IJVPLE.328772>.
6. Durante Z., Sarkar B., Gong R. [et al.]. An Interactive Agent Foundation Model // *arXiv.org*. – 2024. – URL: <https://arxiv.org/abs/2402.05929>. – DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.05929>.
7. Ivanova T. A multi-agent architecture for learning paths-based personalized e-learning systems // *International Journal on Information Technologies and Security*. – 2023. – Vol. 15, Iss. 4. – P. 49–60. – DOI: <https://doi.org/10.59035/QEZA3869>.
8. Sajja R., Sermet Y., Cikmaz M. [ra in.]. Artificial Intelligence-Enabled Intelligent Assistant for Personalized and Adaptive Learning in Higher Education // *Information*. – 2024. – Vol. 15, Iss. 10. – P. 596. – DOI: <https://doi.org/10.3390/info15100596>.
9. Usachov, V., & Titov, G. (2025). Metody strukturyzatsii ta personalizatsii kontentu v systemakh dystantsiinoho navchannia na osnovi avtomatno-hrafovoi modeli. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences.*, 357(5.2). URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-80>
10. Chen J., Lu X., Rejtig M. [ra in.]. Learning Agent-based Modeling with LLM Companions: Experiences of Novices and Experts Using ChatGPT & NetLogo Chat // *Proceedings of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. – 2024. – P. 1–18. – DOI: <https://doi.org/10.1145/3613904.3642377>.
11. Gligorea I., Cioca M., Oancea R. [ra in.]. Adaptive Learning Using Artificial Intelligence in e-Learning: A Literature Review // *Education Sciences*. – 2023. – Vol. 13, Iss. 12. – P. 1216. – DOI: <https://doi.org/10.3390/educsci13121216>.
12. Nagahisarchoghaei M., Nur N., Cummins L. [ra in.]. An Empirical Survey on Explainable AI Technologies: Recent Trends, Use-Cases, and Categories from Technical and Application Perspectives // *Electronics*. – 2023. – Vol. 12, Iss. 5. – P. 1092. – DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12051092>.
13. Hamida S. U., Chowdhury M. J. M., Chakraborty N. R. [ra in.]. Exploring the Landscape of Explainable Artificial Intelligence (XAI): A Systematic Review of Techniques and Applications // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 8, Iss. 11. – P. 149. – DOI: <https://doi.org/10.3390/bdccc8110149>
14. Guleria P., Sood M. Explainable AI and machine learning: performance evaluation and explainability of classifiers on educational data mining inspired career counseling // *Education and Information Technologies*. – 2022. – Vol. 28, Iss. 1. – P. 1081–1116. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11221-2>.
15. Alsafari B., Atwell E., Walker A., Callaghan M. Towards effective teaching assistants: From intent-based chatbots to LLM-powered teaching assistants // *Natural Language Processing Journal*. – 2024. – Vol. 8. – P. 100101.
16. Kuhail M. A., Alturki N., Alramlawi S., Alhejori K. Interacting with educational chatbots: A systematic review // *Education and Information Technologies*. – 2023. – Vol. 28, Iss. 1. – P. 973–1018.
17. Chang D. H., Lin M. P.-C., Hajian S., Wang Q. Q. Educational Design Principles of Using AI Chatbot That Supports Self-Regulated Learning in Education: Goal Setting, Feedback, and Personalization // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15, Iss. 17. – P. 12921. – DOI: <https://doi.org/10.3390/su151712921>.
18. Mustfa M. J., Ashiq S. Harnessing the Power of Artificial Intelligence for Adaptive Learning Systems: A Systematic Review // *International Journal of Education and Management Engineering (IJEME)*. – 2024. – Vol. 14, Iss. 5. – P. 12–22. – DOI: <https://doi.org/10.5815/ijeme.2024.05.02>.
19. Jin H., Lee S., Shin H., Kim J. Teach AI How to Code: Using Large Language Models as Teachable Agents for Programming Education // *Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. – Нью-Йорк, США : ACM Press, 2024. – P. 1–28. – DOI: <https://doi.org/10.1145/3613904.3642349>.
20. Jin S.-H., Im K., Yoo M. [ra in.]. Supporting students' self-regulated learning in online learning using artificial intelligence applications // *International Journal of Educational Technology in Higher Education*. – 2023. – Vol. 20, Iss. 1. – P. 37. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s41239-023-00406-5>.
21. Lin M. P.-C., Chang D. H., Winne P. H. A proposed methodology for investigating student-chatbot interaction patterns in giving peer feedback // *Educational Technology Research and Development*. – 2024. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11423-024-10408-3>.
22. Alotaibi N. S. The Impact of AI and LMS Integration on the Future of Higher Education: Opportunities, Challenges, and Strategies for Transformation // *Sustainability*. – 2024. – Vol. 16, Iss. 23. – P. 10357. – DOI: <https://doi.org/10.3390/su162310357>.
23. Yan L., Greiff S., Teuber Z., Gašević D. Promises and challenges of generative artificial intelligence for human learning // *Nature Human Behaviour*. – 2024. – Vol. 8, Iss. 10. – P. 1839–1850. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41562-024-02004-5>.
24. Mehrotra S. [ra in.]. Integrity based explanations for fostering appropriate trust in AI agents // *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems*. – 2023. – DOI: <https://doi.org/10.1145/3610578>.
25. Susnjak T. Beyond predictive learning analytics modelling and onto explainable artificial intelligence with prescriptive analytics and ChatGPT // *International Journal of Artificial Intelligence in Education*. – 2023. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s40593-023-00336-3>.
26. Yan L. [ra in.]. Practical and ethical challenges of large language models in education: a systematic scoping review // *British Journal of Educational Technology*. – 2023. – DOI: <https://doi.org/10.1111/bjet.13370>.
27. Pinto A. S. [ra in.]. How machine learning (ML) is transforming higher education: a systematic literature review // *Journal of information systems engineering and management*. – 2023. – Vol. 8, Iss. 2. – P. 21168. – DOI: <https://doi.org/10.55267/iad.07.13227>.
28. Chawla C. [ra in.]. Agentic AI: The building blocks of sophisticated AI business applications // *Journal of AI, robotics & workplace automation*. – 2024. – Vol. 3, Iss. 3. – P. 1. – URL: <https://doi.org/10.69554/xehz1946>.
29. Raees M. [ra in.]. From explainable to interactive AI: A literature review on current trends in human-AI interaction // *International journal of human-computer studies*. – 2024. – P. 103301. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2024.103301>.
30. Dwivedi R. [ra in.]. Explainable AI (XAI): core ideas, techniques and solutions // *ACM computing surveys*. – 2022. – URL: <https://doi.org/10.1145/3561048>.
31. Petrenko A., Vokhranov I. Neural networks: studying their decision-making rules // *System research and information technologies*. – 2023. – Iss. 2. – P. 74–85. – URL: <https://doi.org/10.20535/srit.2308-8893.2023.2.06>.
32. Bazdyrev A. Semi-supervised inverted file index approach for approximate nearest neighbor search // *System research and information technologies*. – 2023. – Iss. 4. – P. 69–75. – URL: <https://doi.org/10.20535/srit.2308-8893.2023.4.05>.