



УДК 378.147:004.94

[https://doi.org/10.52058/2786-6165-2026-1\(43\)-2229-2240](https://doi.org/10.52058/2786-6165-2026-1(43)-2229-2240)

Леонт'єва Вікторія Володимирівна кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри фундаментальної та прикладної математики, Запорізький національний університет, доцент кафедри вищої математики і фізики, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, Запоріжжя, <https://orcid.org/0000-0002-9863-9712>

Кондрат'єва Наталія Олександрівна кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри фундаментальної та прикладної математики, Запорізький національний університет, Запоріжжя, <https://orcid.org/0000-0002-6994-2536>

МЕТОДИКА ВИКЛАДАННЯ КУРСУ «КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИРОДНИЧИХ СИСТЕМ ТА ПРОЦЕСІВ» У ЗАКЛАДАХ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Анотація. Стаття присвячена обґрунтуванню методичних засад викладання курсу комп'ютерного моделювання природничих систем та процесів у закладах вищої освіти в умовах зростаючої потреби у фахівцях, здатних ефективно застосовувати методи моделювання для дослідження різноманітних систем. Актуальність дослідження обумовлена обмеженнями традиційних методів вивчення природничих систем, коли проведення натурних експериментів може бути неможливим, занадто дорогим або небезпечним. У роботі здійснено аналіз сучасних досліджень щодо використання комп'ютерних симуляцій у STEM-освіті, який засвідчив суттєвий позитивний вплив симуляційного навчання на формування складних когнітивних навичок студентів. Розроблено структуру курсу, яка охоплює шість тематичних модулів: методологічні засади комп'ютерного моделювання, моделювання фізичних процесів, моделювання хімічних систем, моделювання біологічних, екологічних та економічних систем, стохастичні моделі та методи імітаційного моделювання, а також інтеграційний модуль виконання комплексного проєкту. Кожен модуль передбачає вивчення специфічних методів та практичне застосування на конкретних прикладах систем відповідної природи. Обґрунтовано застосування інтерактивних симуляцій та віртуальних лабораторій як ключових педагогічних інструментів, що забезпечують активне залучення студентів та дозволяють експериментувати з системами без обмежень щодо вартості



обладнання або безпеки. Для різних типів систем рекомендовано використання спеціалізованих платформ: PhET для фізики, ChemCollective та Labster для хімії, Cell Collective та SimBio для біології, Vensim та NetLogo для економічних систем. Запропоновано методичні рекомендації щодо організації практичних занять за принципом дослідницького навчання з формулюванням гіпотези, плануванням експерименту, аналізом даних та критичним обговоренням висновків. Особливістю методики є використання концептуального моделювання, коли студенти самостійно створюють моделі досліджуваних систем та реалізують їх у вигляді програм. Запропонована методика ґрунтується на використанні міждисциплінарного підходу, який демонструє універсальність математичних методів для опису різних явищ від фізичних процесів до економічних систем, що сприяє формуванню системного мислення у майбутніх фахівців.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, методика викладання, природничі системи, інтерактивні симуляції, віртуальні лабораторії, дослідницьке навчання, STEM-освіта, вища освіта, міждисциплінарний підхід, педагогічні технології.

Leontieva Viktoriia Volodimirivna Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Associate professor, Associate professor of the Department of Fundamental and Applied Mathematics, Zaporizhzhia National University, Associate professor of the Department of Higher Mathematics and Physics, **Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University**, Zaporizhzhia, <https://orcid.org/0000-0002-9863-9712>

Kondratieva Nataliia Oleksandrivna Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Associate professor, Associate professor of the Department of Fundamental and Applied Mathematics, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, <https://orcid.org/0000-0002-6994-2536>

METHODOLOGY FOR TEACHING THE COURSE «COMPUTER MODELING OF NATURAL SYSTEMS AND PROCESSES» IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

Abstract. The article is devoted to substantiating the methodological foundations for teaching a course on computer modeling of natural systems and processes in higher education institutions in the context of growing demand for specialists capable of effectively applying modeling methods to study various systems. The research relevance is determined by the limitations of traditional methods for studying natural systems, when conducting field experiments may be



impossible, too expensive, or dangerous. The work analyzes modern research on the use of computer simulations in STEM education, which demonstrated a significant positive impact of simulation-based learning on the formation of complex cognitive skills in students. A course structure has been developed that covers six thematic modules: methodological foundations of computer modeling, modeling of physical processes, modeling of chemical systems, modeling of biological, ecological and economic systems, stochastic models and simulation methods, and an integrative module for executing a comprehensive project. Each module involves studying specific methods and practical application to concrete examples of systems of corresponding nature. The application of interactive simulations and virtual laboratories as key pedagogical tools is substantiated, ensuring active student engagement and allowing experimentation with systems without limitations regarding equipment cost or safety. For different types of systems, the usage of specialized platforms is recommended: PhET for physics, ChemCollective and Labster for chemistry, Cell Collective and SimBio for biology, Vensim and NetLogo for economic systems. Methodological recommendations for organizing practical classes based on the inquiry-based learning principle are proposed with hypothesis formulation, experiment planning, data analysis, and critical discussion of conclusions. A distinctive feature of the methodology is the use of conceptual modeling, where students independently create models of studied systems and implement them as programs. The proposed methodology is based on the usage of an interdisciplinary approach, which demonstrates the versatility of mathematical methods for describing various phenomena, from physical processes to economical systems, contributing to the formation of systematic thinking of future specialists.

Keywords: computer modeling, teaching methodology, natural systems, interactive simulations, virtual laboratories, inquiry-based learning, STEM education, higher education, interdisciplinary approach, pedagogical technologies.

Постановка проблеми. Комп'ютерне моделювання природничих систем та процесів набуло особливого значення у сучасній науці та освіті, оскільки дозволяє досліджувати явища, які неможливо або економічно недоцільно вивчати безпосередньо в реальних умовах [1]. Комп'ютерні моделі стали універсальним інструментом дослідження і застосовуються в різних областях – у фізиці для моделювання механічних коливань, електромагнітних явищ та квантових процесів, у хімії для дослідження кінетики реакцій та молекулярної динаміки, у біології для вивчення популяційних процесів та метаболічних шляхів, в екології для аналізу динаміки екосистем та впливу антропогенних факторів, в економіці для



прогнозування ринкових процесів та оптимізації виробничих систем. За таких обставин підготовка фахівців, здатних ефективно застосовувати методи комп'ютерного моделювання для дослідження різноманітних систем, стає одним із пріоритетних завдань вищої освіти.

Актуальність дослідження обумовлена тим, що традиційні методи вивчення природничих систем часто мають суттєві обмеження. Проведення натурних експериментів із небезпечними хімічними реакціями, ядерними процесами, високотемпературними явищами, тривалими біологічними процесами і т.ін. може бути неможливим, занадто дорогим або небезпечним. Комп'ютерні симуляції дозволяють подолати ці обмеження та створюють унікальні можливості для дослідження динаміки складних систем у контрольованих умовах [2]. Водночас методика викладання комп'ютерного моделювання природничих систем у вітчизняних закладах вищої освіти потребує суттєвого вдосконалення з урахуванням сучасних досягнень педагогічної науки та інформаційних технологій.

Особливої актуальності набуває проблема формування у студентів здатності використовувати комп'ютерні моделі для прогнозування поведінки різноманітних систем та обґрунтування інженерних, наукових та управлінських рішень. Так, моделювання фізичних процесів є основою сучасного проєктування технічних систем, моделювання хімічних реакцій забезпечує оптимізацію технологічних процесів, моделювання біологічних систем має застосування у фармацевтиці та біотехнології, екологічне моделювання є інструментом оцінки впливу на довкілля та управління природними ресурсами, а економіко-математичне моделювання дозволяє прогнозувати розвиток економічних систем та оптимізувати розподіл ресурсів [3]. Відтак виникає нагальна потреба у розробці науково обґрунтованої методики викладання відповідного курсу, яка б забезпечувала формування необхідних компетентностей на основі вивчення широкого спектру явищ різної природи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблеми використання комп'ютерних симуляцій у STEM-освіті досліджувалися у численних зарубіжних публікаціях. Дослідження, проведене в роботі [4], засвідчило суттєвий позитивний вплив симуляційного навчання на формування складних когнітивних навичок у студентів вищої школи, показавши при цьому, що ефективність симуляцій значно зростає за умови застосування структурованих педагогічних підходів та зворотного зв'язку. Систематичний огляд літератури щодо цифрових симуляцій у STEM-освіті засвідчив, що інтерактивні симуляції є найбільш поширеним типом цифрових інструментів, а дослідницьке навчання — найчастіше застосовуваною педагогічною стратегією [5].



Значний внесок у розвиток методики комп'ютерного моделювання у природничій освіті зробили проєкти PhET Interactive Simulations та SimBio, які забезпечують доступ до інтерактивних симуляцій з фізики, хімії та біології. Дослідження ефективності цих інструментів засвідчили покращення концептуального розуміння студентами наукових принципів на 30–40% порівняно з традиційним навчанням [6]. Водночас питання систематичної інтеграції таких інструментів у навчальний процес вищої школи потребують подальшого дослідження.

Ефективність інтерактивних комп'ютерних симуляцій як педагогічного інструменту у біологічних та хімічних лабораторіях досліджувались в роботі [7]. Результати контрольованого експерименту з великою вибіркою студентів ($N = 515$) засвідчили суттєве підвищення навчальних досягнень у групах, які використовували комп'ютерні симуляції хімічних реакцій у поєднанні зі стандартною лабораторною роботою. Автори пояснюють цей ефект посиленням когнітивного залучення та можливістю зосередитися на концептуальному розумінні процесів, а не на технічних деталях експерименту.

Важливим напрямом досліджень є застосування агентного моделювання у природничій освіті. З розвитком комп'ютерних технологій агентні моделі стали привабливим інструментом для вивчення систем зі значною стохастичністю, нелінійними взаємодіями та гетерогенними структурами [8]. Під педагогічним підходом до використання агентних моделей вони стають засобом для проведення мінідослідницьких проєктів, що дозволяє реалізувати експерименти, які були б неможливі через вартість, логістичні або етичні обмеження. Водночас питання адаптації зарубіжного досвіду до умов вітчизняної вищої освіти та розробки відповідних методичних рекомендацій потребують подальшого дослідження.

Мета статті полягає в обґрунтуванні методичних засад викладання курсу «Комп'ютерне моделювання природничих систем та процесів» у закладах вищої освіти.

Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання наступних завдань:

- визначення структури та змісту курсу з урахуванням різноманітності природничих систем та сучасних тенденцій розвитку комп'ютерного моделювання;
- обґрунтування застосування інтерактивних симуляцій та віртуальних лабораторій в якості педагогічних інструментів;
- розробка методичних рекомендацій щодо організації практичних занять із моделювання фізичних, хімічних, біологічних, екологічних та економічних систем.



Структура та зміст курсу комп'ютерного моделювання природничих систем. Розроблений курс «Комп'ютерне моделювання природничих систем та процесів» охоплює *шість тематичних модулів*, які відображають різноманітність підходів до моделювання та типів природничих систем.

Перший модуль присвячений методологічним засадам комп'ютерного моделювання та включає вивчення типів моделей (аналітичні, симуляційні, емпіричні), критеріїв вибору методу моделювання, принципів верифікації та валідації моделей. Студенти опановують загальну схему комп'ютерного моделювання, яка охоплює етапи від концептуалізації задачі до інтерпретації результатів, та вивчають особливості застосування різних програмних середовищ для моделювання.

Другий модуль зосереджений на моделюванні фізичних процесів та систем і передбачає використання методів розв'язання диференціальних рівнянь, що описують механічні, електромагнітні та теплові явища. Студенти опановують моделювання коливальних процесів (гармонічний осцилятор, зв'язані коливання, хвильові процеси), теплопровідності та дифузії, руху тіл у полі сил, електричних кіл та електромагнітних полів. Практичні завдання включають моделювання руху небесних тіл, коливань маятників різних типів, поширення тепла у твердих тілах, процесів зарядки та розрядки конденсаторів. Особлива увага приділяється візуалізації фізичних процесів та анімації динаміки систем.

Третій модуль присвячений моделюванню хімічних систем та процесів і охоплює кінетику хімічних реакцій, хімічну рівновагу та молекулярну динаміку. Студенти вивчають моделювання реакцій різних порядків, каталітичних процесів, ланцюгових реакцій, а також рівноважних станів у хімічних системах. Практичні завдання передбачають моделювання кінетики конкретних реакцій, оптимізацію умов проведення реакцій, аналіз впливу температури та концентрації реагентів на швидкість процесу.

Четвертий модуль охоплює моделювання біологічних, екологічних та економічних систем, що характеризуються складними взаємозв'язками між компонентами та нелінійною динамікою. У біологічному блоці студенти вивчають моделювання популяційної динаміки (експоненційний та логістичний ріст, моделі «хижак-жертва», конкуренція видів), поширення інфекційних захворювань, генетичних процесів та нейронної активності. Екологічний блок присвячений моделюванню динаміки екосистем, кругообігу речовин та енергії, впливу забруднення на природні системи, зміни клімату та його наслідків для біорізноманіття. Економічний блок охоплює моделювання ринкової рівноваги (модель попиту та пропозиції), динаміки макроекономічних показників (моделі економічного зростання),



оптимізації виробничих процесів (задачі лінійного програмування), а також соціально-економічних процесів із застосуванням системної динаміки [9]. Практичні завдання включають моделювання динаміки популяцій у екосистемах, оцінку екологічних ризиків, прогнозування попиту на продукцію, оптимізацію розподілу ресурсів підприємства.

П'ятий модуль присвячений стохастичним моделям та методам імітаційного моделювання, що застосовуються для дослідження систем із суттєвим впливом випадкових факторів. Студенти вивчають метод Монте-Карло, стохастичні диференціальні рівняння, агентне моделювання та дискретно-подієве моделювання. Практичні завдання включають моделювання броунівського руху, радіоактивного розпаду, флуктуацій у хімічних системах, стохастичної динаміки популяцій, випадкових процесів на фінансових ринках, поведінки споживачів та формування громадської думки.

Шостий модуль має інтеграційний характер та передбачає виконання комплексного проекту з моделювання обраної природничої системи [10]. На цьому етапі студенти застосовують набуті знання та вміння для самостійного дослідження реальної проблеми, що включає постановку задачі, обґрунтування вибору методу моделювання, розробку та верифікацію моделі, аналіз чутливості параметрів, інтерпретацію результатів та підготовку звіту. Тематика проектів охоплює широкий спектр природничих систем і обирається студентами відповідно до їх наукових інтересів та спеціалізації.

Застосування інтерактивних симуляцій та віртуальних лабораторій. Ключовою особливістю розробленої методики є широке застосування інтерактивних комп'ютерних симуляцій в якості педагогічних інструментів. Симуляції дозволяють студентам взаємодіяти з моделями та маніпулювати змінними у віртуальному середовищі, що сприяє експериментальному навчанню та глибшому розумінню наукових концепцій [11]. На відміну від традиційного лекційного викладання, інтерактивні симуляції забезпечують активне залучення студентів до процесу пізнання та дозволяють спостерігати динаміку процесів у реальному часі. Це особливо важливо для вивчення процесів, які відбуваються занадто швидко (хімічні реакції, зіткнення частинок) або занадто повільно (геологічні процеси, еволюція) для безпосереднього спостереження.

Віртуальні лабораторії є важливим компонентом курсу, оскільки дозволяють проводити експерименти з різноманітними системами без обмежень, пов'язаних із вартістю обладнання, безпекою або часовими рамками. Моделювання дозволяє досліджувати процеси при екстремальних умовах, у масштабах часу від фемтосекунд до мільйонів років, а також



експериментувати з економічними та екологічними системами без реальних ризиків [12]. Для моделювання фізичних процесів пропонується використовувати симуляції PhET, для хімічних систем – віртуальні лабораторії ChemCollective та Labster, для біологічних процесів – платформи Cell Collective та SimBio, для економічних та соціальних систем – середовища системної динаміки (Vensim, Stella) та агентного моделювання (NetLogo). Така різноманітність інструментів дозволяє обирати оптимальне середовище для кожного типу задач.

Важливим аспектом застосування симуляцій є їх поєднання з традиційними методами навчання. Дослідження засвідчують, що найбільший навчальний ефект досягається при комбінуванні роботи з симуляціями та реальної лабораторної практики [13]. В пропонованій в роботі методиці передбачено послідовність занять, де теоретичне вивчення концепцій супроводжується роботою з інтерактивними моделями, а потім – аналізом та обговоренням результатів. Студенти спочатку досліджують явище за допомогою симуляції, формують гіпотези щодо його механізму, а потім, де це можливо, перевіряють свої припущення у реальному експерименті. Такий підхід сприяє глибшому осмисленню взаємозв'язку між моделлю та реальністю.

Особливістю розробленої методики є використання концептуального моделювання в якості педагогічного підходу, що охоплює широкий спектр природничих систем. Студенти не лише працюють із готовими симуляціями, а й самостійно створюють концептуальні моделі досліджуваних систем, які потім реалізують у вигляді комп'ютерних програм. Такий підхід формує розуміння того, що одні й ті ж математичні структури (диференціальні рівняння, стохастичні процеси, мережеві моделі) можуть описувати принципово різні природничі явища – від коливань маятника до динаміки хімічних реакцій та поширення епідемій.

Методичні рекомендації щодо організації практичних занять. Практичні заняття з комп'ютерного моделювання природничих систем та процесів організовуються за принципом дослідницького навчання, який передбачає постановку проблемних питань та пошук відповідей через експериментування з моделями. Дослідницьке навчання визнано найефективнішою педагогічною стратегією при використанні цифрових симуляцій у STEM-освіті [14]. Кожне практичне заняття структурується як мінідослідження, що включає формулювання гіпотези, планування обчислювального експерименту, збір та аналіз даних, формулювання висновків та їх критичне обговорення.

При роботі з *моделями фізичних процесів* рекомендуємо організовувати заняття навколо дослідження впливу параметрів на динаміку системи.



Студенти систематично змінюють значення параметрів (маса, жорсткість, коефіцієнт тертя, початкові умови) та спостерігають за зміною поведінки системи, що дозволяє глибше зрозуміти фізичну природу досліджуваних процесів. Особливо ефективним є порівняння результатів чисельного моделювання з аналітичними розв'язками для простих випадків, що формує розуміння можливостей та обмежень чисельних методів.

При *моделюванні хімічних систем* особлива увага приділяється дослідженню кінетичних закономірностей та умов досягнення рівноваги. Студенти вивчають вплив температури, концентрації реагентів, наявності каталізатора на швидкість та рівновагу реакцій. Важливим аспектом є моделювання складних реакційних систем із послідовними та паралельними реакціями, що дозволяє зрозуміти механізми селективності та оптимізувати умови проведення процесів. Практичні завдання включають моделювання промислово важливих процесів, таких як синтез амоніаку, окиснення органічних сполук, ферментативний каталіз.

При роботі з *біологічними, екологічними та економічними моделями* акцент робиться на дослідженні емерджентних властивостей – складних явищ, що виникають із взаємодії простіших компонентів системи. Прості правила взаємодії між локальними елементами можуть призводити до складної динаміки на рівні системи. Студенти вчаться аналізувати, як параметри на мікрорівні (швидкості народження та смерті, коефіцієнти передачі інфекції, індивідуальні рішення економічних агентів) впливають на поведінку системи на макрорівні (стабільність популяцій, динаміка епідемій, ринкова рівновага, екологічна стійкість).

Важливою складовою методики є організація колективної роботи студентів над проектами міждисциплінарного характеру, яка сприяє розвитку комунікативних навичок та формуванню здатності до міждисциплінарної взаємодії, що є важливим для сучасного фахівця. Окрема увага приділяється формуванню у студентів навичок візуалізації результатів моделювання та їх інтерпретації. Графічне представлення динаміки систем, фазові портрети, анімація процесів – все це є важливими інструментами аналізу та комунікації результатів дослідження. Студенти вчаться обирати адекватні способи візуалізації залежно від характеру даних та аудиторії презентації.

Висновки. Проведене дослідження дозволило обґрунтувати методичні засади викладання курсу «Комп'ютерне моделювання природничих систем та процесів» у закладах вищої освіти. Особливістю запропонованої методики є використання міждисциплінарного підходу, який демонструє універсальність математичних методів моделювання для опису принципово різних явищ – від фізичних процесів до економічних систем. В рамках



розробленої методики в роботі: запропоновано структуру курсу, яка охоплює шість тематичних модулів: від методологічних засад до комплексного проєктного дослідження, з охопленням широкого спектру явищ – фізичних, хімічних, біологічних, екологічних та економічних; обґрунтовано застосування інтерактивних симуляцій та віртуальних лабораторій в якості педагогічних інструментів, що забезпечують активне залучення студентів та глибше засвоєння навчального матеріалу; запропоновано методичні рекомендації щодо організації практичних занять, що ґрунтуються на принципах дослідницького навчання та передбачають систематичне експериментування з моделями фізичних процесів, хімічних реакцій, біологічних, екологічних та економічних систем для глибшого розуміння природи досліджуваних явищ та формування системного мислення.

Література:

1. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень. Ч.1: навч. посіб. / Кветний Р. Н., Богач І. В., Бойко О. Р., Софіна О. Ю., Шушура О.М.; за заг. ред. Р.Н. Кветного. Вінниця: ВНТУ, 2012. 193 с.
2. de Jong T., Linn M. C., Zacharia Z. C. Physical and virtual laboratories in science and engineering education. Science. 2013. Vol. 340. P. 305–309.
3. Wooley J.C., Lin H.S., Sciences, Division on Engineering and Physical Sciences, National Research Council. Catalyzing Inquiry at the Interface of Computing and Biology. Washington: National Academies Press, 2006. 445 p.
4. Chernikova O., Heitzmann N., Stadler M., Holzberger D., Seidel T., Fischer F. Simulation-Based Learning in Higher Education: A Meta-Analysis. Review of Educational Research. 2020. Vol. 90(4). P. 499–541.
5. Kefalis C., Skordoulis C., Drigas A. Digital Simulations in STEM Education: Insights from Recent Empirical Studies, a Systematic Review. Encyclopedia, 2025. 5(1), 10.
6. Smetana L. K., Bell R. L. Computer simulations to support science instruction and learning: A critical review of the literature. International Journal of Science Education. 2012. Vol. 34(9). P. 1337–1370.
7. Whitworth K., Leupen S., Rakes Ch., Bustos M. Interactive Computer Simulations as Pedagogical Tools in Biology Labs. CBE life sciences education. 2018. Vol. 17. ar46.
8. Bodine E. N., Panoff R. M., Voit E. O., Weisstein A. E. Agent-Based Modeling and Simulation in Mathematics and Biology Education. Bulletin of Mathematical Biology. 2020. Vol. 82 (8). 101.
9. Helikar T., Cutucache C. E., Dahlquist L. M., Herek T. A., Larson J.J. et al. Integrating Interactive Computational Modeling in Biology Curricula. PLOS Computational Biology. 2015. Vol. 11(3). e1004131.
10. Wilensky U., Rand W. An Introduction to Agent-Based Modeling: Modeling Natural, Social, and Engineered Complex Systems with NetLogo. Cambridge, Massachusetts; London, England: MIT Press, 2015. 504 p.
11. Magana A. J. Teaching and Learning in STEM With Computation, Modeling, and Simulation Practices: A Guide for Practitioners and Researchers. West Lafayette: Purdue University Press, 2024. 158 p.



12. Zeigler B. P., Praehofer H., Kim T. G. Theory of Modeling and Simulation: Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems. Cambridge: Academic Press, 2000. 510 p.

13. Darkow J. Teaching climate science and resilience with computer simulations. Kaleidoscope: Educator Voices and Perspectives. 2020. Vol. 6(2). P. 6–10.

14. D'Angelo C., Rutstein D., Harris C., Bernard R., Borokhovski E., Haertel G. Simulations for STEM Learning: Systematic Review and Meta-Analysis. Menlo Park, CA: SRI International, 2014. 60 p.

References:

1. Kvietyi, R.N., Bohach, I.V., Boiko, O.R., Sofyna, O.Yu., Shushura, O.M. (2012). Kompiuterne modeliuvannia system ta protsesiv. Metody obchyslen. Ch. 1: navch. posib. [Computer Modeling of Systems and Processes. Computational Methods. Part 1: tutorial]. Vinnytsia: VNTU, 193 p. [in Ukrainian].

2. de Jong, T., Linn, M.C., Zacharia, Z.C. (2013). Physical and virtual laboratories in science and engineering education. Science, 340, 305-309.

3. Wooley, J.C., Lin, H.S. (2006). Catalyzing Inquiry at the Interface of Computing and Biology. Washington: National Academies Press, 445 p.

4. Chernikova, O., Heitzmann, N., Stadler, M., Holzberger, D., Seidel, T., Fischer, F. (2020). Simulation-Based Learning in Higher Education: A Meta-Analysis. Review of Educational Research, 90(4), 499-541.

5. Kefalis, C., Skordoulis, C., Drigas, A. (2025). Digital Simulations in STEM Education: Insights from Recent Empirical Studies, a Systematic Review. Encyclopedia, 5(1), 10.

6. Smetana, L.K., Bell, R.L. (2012). Computer simulations to support science instruction and learning: A critical review of the literature. International Journal of Science Education, 34(9), 1337-1370.

7. Whitworth, K., Leupen, S., Rakes, Ch., Bustos, M. (2018). Interactive Computer Simulations as Pedagogical Tools in Biology Labs. CBE Life Sciences Education, 17, ar46.

8. Bodine, E.N., Panoff, R.M., Voit, E.O., Weisstein, A.E. (2020). Agent-Based Modeling and Simulation in Mathematics and Biology Education. Bulletin of Mathematical Biology, 82(8), 101.

9. Helikar, T., Cutucache, C.E., Dahlquist, L.M., Herek, T.A., Larson, J.J. et al. (2015). Integrating Interactive Computational Modeling in Biology Curricula. PLOS Computational Biology, 11(3), e1004131.

10. Wilensky, U., Rand, W. (2015). An Introduction to Agent-Based Modeling: Modeling Natural, Social, and Engineered Complex Systems with NetLogo. Cambridge, Massachusetts; London, England: MIT Press, 504 p.

11. Magana, A.J. (2024). Teaching and Learning in STEM With Computation, Modeling, and Simulation Practices: A Guide for Practitioners and Researchers. West Lafayette: Purdue University Press, 158 p.

12. Zeigler, B.P., Praehofer, H., Kim, T.G. (2000). Theory of Modeling and Simulation: Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems. Cambridge: Academic Press, 510 p.

13. Darkow, J. (2020). Teaching climate science and resilience with computer simulations. Kaleidoscope: Educator Voices and Perspectives, 6(2), 6-10.



14. D'Angelo, C., Rutstein, D., Harris, C., Bernard, R., Borokhovski, E., Haertel, G. (2014). Simulations for STEM Learning: Systematic Review and Meta-Analysis. Menlo Park, CA: SRI International, 60 p.