

## ЕКОЛОГІЧНА ОСВІТА

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2024-30-08>

УДК (UDC): 504.064

**А. Г. КОТ<sup>1</sup>,**

аспірант кафедри екології та менеджменту довкілля

e-mail: [anna.kot@karazin.ua](mailto:anna.kot@karazin.ua) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4700-2620>

**А. Б. АЧАСОВ<sup>1</sup>,** д-р с.-г. наук, проф.,

в.о. завідувача кафедри екології та менеджменту довкілля

e-mail: [achasov@karazin.ua](mailto:achasov@karazin.ua) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5009-7184>

**О. Ю. СЕЛІВЕРСТОВ<sup>1</sup>,**

аспірант кафедри екології та менеджменту довкілля

e-mail: [oleg.seliverstov@karazin.ua](mailto:oleg.seliverstov@karazin.ua) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8477-274X>

**В. Г. КАРПОВ<sup>1</sup>,**

доцент кафедри екології та менеджменту довкілля

e-mail: [karpov@karazin.ua](mailto:karpov@karazin.ua) ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-9905-0277>

<sup>1</sup>Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна  
майдан Свободи, 4, 61022, Харків, Україна

### ІНСТРУМЕНТАРІЙ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ У ПІДГОТОВЦІ СТУДЕНТІВ ЕКОЛОГІЧНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ

Використання комп'ютерного моделювання та прогнозування для аналізу та передбачення складних системних процесів, зокрема у сфері охорони навколишнього середовища, є надзвичайно важливим. Для студентів екологічних спеціальностей володіння навичками моделювання є ключовим аспектом. На ринку існують принаймні дві комп'ютерні програми імітаційного моделювання, які мають безкоштовні версії для студентської освіти: VensimPLE і AnyLogicPLE. Вони дозволяють використовувати імітаційне моделювання та системну динаміку для аналізу та прогнозування екологічних процесів. Студентам надається можливість створювати та вивчати різноманітні сценарії розвитку подій за допомогою математичних моделей. Студентам пропонується створити та дослідити модель "Predator Prey", яка базується на системі диференціальних рівнянь Вольтерри-Лотки. Модель описує динаміку популяції хижаків та жертв у замкнутій та стаціонарній системі. На основі рівнянь, які враховують розмноження та загибель обох видів, студентам потрібно дослідити взаємодію між популяціями при різних вхідних параметрах. Модель має два етапи: спочатку створюються накопичувачі з початковими значеннями популяцій, потім додаються параметри, які регулюють потоки. На прикладі наведеної моделі, висвітлюється можливість досліджувати вплив різних факторів на динаміку екосистем та розуміти його глибше.

**Висновки.** Застосування методу системної динаміки дозволяє будувати стратегічні імітаційні моделі, необхідні для ухвалення управлінських рішень у сфері природоохоронної діяльності та раціонального використання ресурсів. Це важливо для практичного застосування знань студентів у майбутній професійній діяльності. Такі навички допоможуть їм ефективно впливати на стан довкілля та приймати обґрунтовані рішення щодо його збереження.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** комп'ютерне моделювання, прогнозування, системна динаміка, імітаційне моделювання, екологічна спеціальність, VensimPLE, AnyLogicPLE

**Як цитувати:** Кот А. Г., Ачасов А. Б., Селіверстов О. Ю., Карпов В. Г. Інструментарій імітаційного моделювання у підготовці студентів екологічних спеціальностей. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія».* 2024. Вип. 30. С. 105 - 117. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2024-30-08>

**Cites:** Kot, A. G., Achasov, A. B., Seliverstov, O. Yu., & Karpov, V. G. (2024). Simulation modeling tools in training environmental science students. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, (30), 105 – 117. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2024-30-08> (In Ukrainian)

## Вступ

Кожна дія людини ґрунтується на аналізі інформації та прогнозі ситуації. Зрозуміло, що чим більшого масштабу завдання стоїть перед індивідом, колективом або суспільством, тим якіснішою має бути інформація та тим надійнішими методи та засоби прогнозування. Залишимо поза скобками обґрунтування необхідності використання для цього сучасної комп'ютерної техніки, зараз це вже ні в кого не викликає сумнівів. Відмітимо лише, що сучасне комп'ютерне програмне забезпечення пропонує безліч варіантів для моделювання та прогнозування процесів та ситуацій, що цікавлять, від найпростіших — побудова звичайних регресійних рівнянь, до складних — конструювання складних динамічних систем та імітаційного моделювання процесів, які відбуваються в них [1 - 5].

Особливо важливі вміння моделювати ситуації та прогнозувати наслідки для студентів, чие майбутнє професійне життя буде пов'язане з охороною навколишнього середовища. Адже контакт людини з природою дуже часто утворює складні системи та викликає стохастичні процеси, для опису яких й застосовується імітаційне моделювання [3,6]. Зауважимо, що згідно зі Стандартом вищої освіти України для бакалаврів зі спеціальності «101 – Екологія» серед програмних результатів навчання зазначені: «ПР10. Уміти застосувати програмні засоби, ГІС-технології та ресурси Інтернету для інформаційного забезпечення екологічних досліджень» та «ПР11. Уміти прогнозувати вплив технологічних процесів та виробництва на навколишнє середовище» [7 - 9].

Імітаційне моделювання та системна динаміка це два підходи до аналізу та моделювання поведінки складних систем, таких як економічні системи, екологічні системи, соціальні групи та технічні процеси.

Маємо повністю погодитись з Ситник В. Ф. та Орленко Н. С. [10] щодо плутанини з термінологією. В англійській літературі здебільшого використовуються такі терміни: *compu-*

*ter simulation* (комп'ютерне моделювання), *systems simulation* (системне моделювання), *digital simulation* (цифрове моделювання). У вітчизняній літературі розповсюджені терміни «машинна імітація», «машинне моделювання», «імітаційне моделювання», причому найбільшого поширення набув останній, на наш погляд, найбільш невдалий термін («імітаційне моделювання» — тавтологія).

Імітаційне моделювання (або комп'ютерне моделювання) є більш широким поняттям ніж системна динаміка. В імітаційних моделях створюються комп'ютерні аналоги реальних процесів і систем, і ці моделі можуть бути використані для вивчення та передбачення поведінки цих систем [4]. Імітаційне моделювання враховує взаємодії між окремими частинами системи, а також їхні реакції на зміни в умовах. Зазвичай імітаційні моделі працюють у віртуальному часі, дозволяючи дослідникам спостерігати, як система поводить себе в різних сценаріях та з різними параметрами [4,11,12].

Бачинський Г.О. вважає найбільш перспективними для застосування в екології є системне та імітаційне моделювання. Вивчення складних динамічних систем доцільно проводити з використанням новітніх досягнень сучасної науки і технологій в обробці інформації – сучасних інформаційних технологій. Український теоретик соціальної екології Г.О. Бачинський вважає, що імітаційне моделювання є найкращим інструментом для дослідження складних систем, що дозволяє розглянути більшу кількість альтернативних варіантів і точніше спрогнозувати наслідки прийняття управлінських рішень, забезпечуючи можливість уникнути небажаних результатів і підвищити позитивний ефект від рішень. Це робить імітаційне моделювання надзвичайно важливим при дослідженні таких складних об'єктів, як екосистеми, безпосереднє експериментування над якими може мати серйозні, а іноді й непоправні наслідки. Зазначає, що системне та імітаційне моделювання є найперспективнішими для застосування в екології. Математич-

не моделювання, зокрема імітаційне, визначається ним як найкращий інструмент для вивчення складних систем [13].

Перспективність використання методів комп'ютерного моделювання в екології взагалі та в екологічній освіті зокрема, показана у роботах В.В.Вітлінського, А.Б.Качинського, В.В.Богобоящого та інших [14-16]. Процеси створення та практичного застосування іміта-

ційних моделей досліджували С.Г. Лобанов, В.Ф. Ситник, Н.С., В.Ф. Беседін, І.В. Крючкова та ін. [17, 18].

Метою є демонстрація можливостей використання наявних відкритих програмних продуктів для надання студентам-екологам навичок застосування методів імітаційного моделювання взагалі, та системної динаміки зокрема, при дослідженні екологічних питань.

### *Матеріали та методи*

Системна динаміка входить до групи імітаційних методів моделювання й ґрунтується на методології моделювання та аналізу динамічних систем з використанням математичних рівнянь та графічних діаграм [19, 20].

Методологія системної динаміки розроблена в 1950-60-х роках професором Массачусетського технологічного інституту Джей Форрестером [21], побудовано комп'ютерні динамічні моделі коеволюції системи «людство-біосфера» в умовах експоненційного росту населення та відповідного навантаження на природне середовище «World-1» і «World-2». Ці моделі склалися з більш ніж сорока нелінійних рівнянь, що описують взаємозалежність вибраних змін. Вони дозволили визначити найближчі глобальні цивілізаційні проблеми та розпочати пошук їх вирішення.

Наступна версія моделі – «World-3» розроблена командою фахівців під керівництвом Денніса Медоуза, учня Д. Форрестера (рис.1). Це був перший випадок застосування комп'ютерного моделювання в дослідженнях такого масштабу. З цією моделлю та її роботою студенти можуть ознайомитись за допомогою онлайн сервісу Insight Maker (<https://insightmaker.com>) [21, 22].

Сервіс репрезентує логічні схеми блоків моделі та дозволяє симулювати процеси розвитку людської цивілізації до 2100 року. На базі цього сервісу, який є прикладом численних «відкритих» імітаційних моделей, студенти можуть виконувати практичні роботи з різноманітних курсів, що пов'язані з прогнозування поведінки складних природно-антропогенних систем. Наприклад, на рис.2 наведені результати моделювання розвитку земельних ресурсів нашої планети. Студенти мають не лише розібратись у складних системних зв'яз

ках моделі та виконати сценарні симуляції процеси, але й проаналізувати отримані результати. Зокрема вивчаючи літературу самостійно пояснити чому модель прогнозує підвищення родючості земель (land fertility) після 2050 року (рис. 2, червона лінія).

Іншим варіантом опанування основ системної динаміки може бути використання студентами платформ Vensim [23] та AnyLogic [24]. Vensim – це програмне забезпечення для системного аналізу та імітаційного моделювання, що розвивається і підтримується компанією Ventana Systems, Inc (zareestrovana u США) [23]. Ця платформа дозволяє користувачам створювати складні динамічні моделі для аналізу різних систем, зокрема екологічних, економічних, соціальних, технічних та багатьох інших. Vensim Personal Learning Edition (PLE) це повнофункціональна версія Vensim, яка є безплатною для особистого та освітнього використання [23].

AnyLogic – програмне забезпечення для імітаційного моделювання, що розробляється компанією The AnyLogic Company (zareestrovana u США) [24]. Це потужний інструмент, який дозволяє створювати комплексні моделі різних систем та процесів, використовуючи різні підходи, такі як системна динаміка, агентне моделювання та процесно-орієнтоване моделювання [24, 25].

Структура моделей у системній динаміці базується на таких основних елементах як «накопичувач» (stock) і «потік» (flow) та зв'язках між ними. Накопичувачі представляють основні показники, які ми хочемо дослідити або прогнозувати в системі. Вони можуть бути фізичними величинами, такими як кількість населення, кількість виробництва або запас

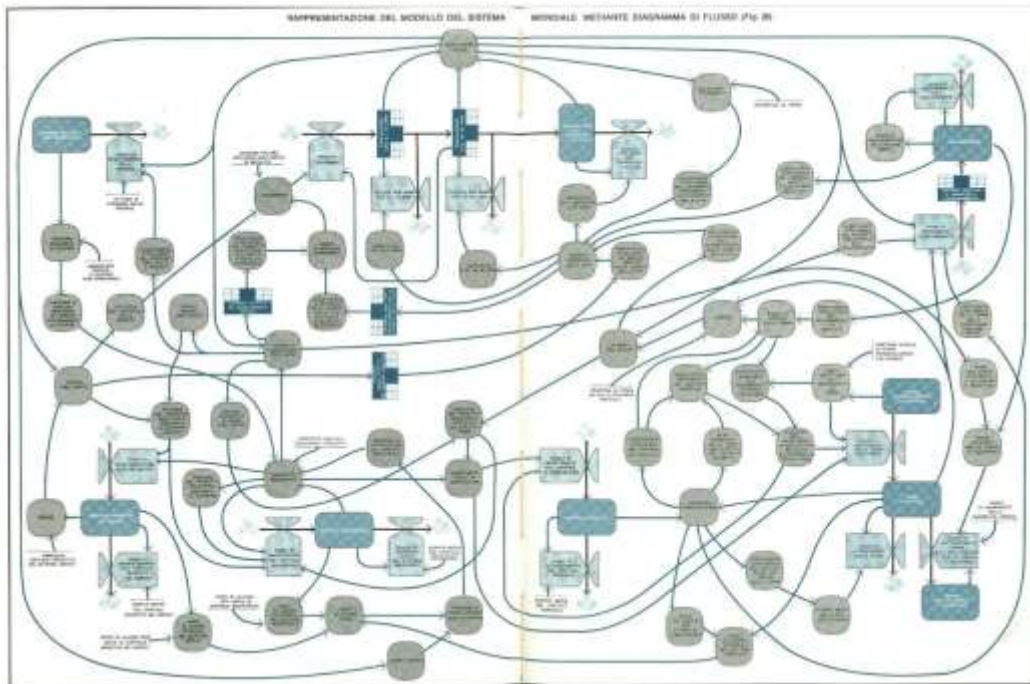


Рис. 1 – Модель «World-3»

[https://miro.medium.com/v2/resize:fit:4800/format:webp/1\\*8K30z6amUZ0bfVuI14ZDRA.jpeg](https://miro.medium.com/v2/resize:fit:4800/format:webp/1*8K30z6amUZ0bfVuI14ZDRA.jpeg)

Fig. 1 – Model «World-3»

[https://miro.medium.com/v2/resize:fit:4800/format:webp/1\\*8K30z6amUZ0bfVuI14ZDRA.jpeg](https://miro.medium.com/v2/resize:fit:4800/format:webp/1*8K30z6amUZ0bfVuI14ZDRA.jpeg)

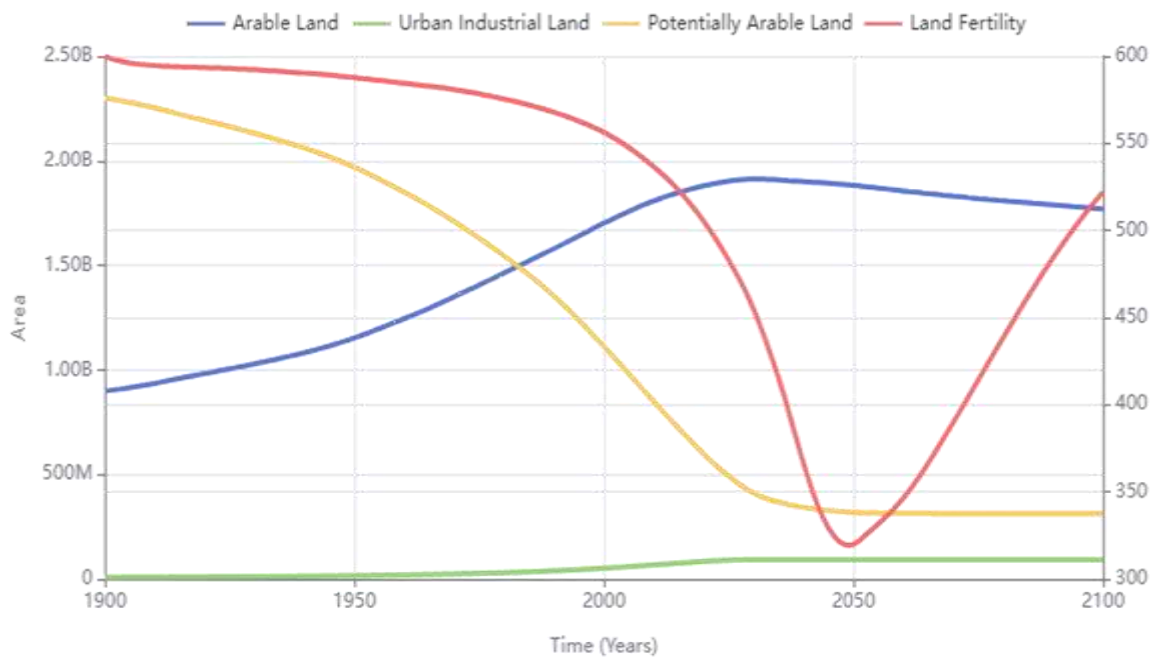


Рис. 2 – Результати моделювання розвитку земельних ресурсів

[https://miro.medium.com/v2/resize:fit:4800/format:webp/1\\*8K30z6amUZ0bfVuI14ZDRA.jpeg](https://miro.medium.com/v2/resize:fit:4800/format:webp/1*8K30z6amUZ0bfVuI14ZDRA.jpeg)

Fig.2 – Results of land resource development modeling

[https://miro.medium.com/v2/resize:fit:4800/format:webp/1\\*8K30z6amUZ0bfVuI14ZDRA.jpeg](https://miro.medium.com/v2/resize:fit:4800/format:webp/1*8K30z6amUZ0bfVuI14ZDRA.jpeg)

ресурсів. Потоки представляють рух або перетік ресурсів між накопичувачами у системі. Вони можуть бути впливами, що змінюють рівень змінних в часі, наприклад, приріст населення або виробництва. Як приклад наведемо відому в класичній екології модель «хижак-жертва» відомої також як модель Вольтерри-

Лотки. Модель описує два біологічних види, які спільно мешкають у деякому ізольованому ареалі проживання, та прогнозує як зміни в чисельності одного виду впливають на чисельність іншого. Модель може бути застосована до різних екологічних ситуацій і допомагає розуміти динаміку популяцій в екосистемах

### Результати та обговорення

Метою пропонованої студентам роботи є побудова моделі та дослідження різних варіантів розвитку подій при зміні вхідних параметрів у моделі Вольтерри-Лотки. Ця математична модель являє собою систему звичайних диференціальних рівнянь першого порядку, що містить дві невідомі функції, а саме: кількість хижаків ( $y$ ) і кількість жертв ( $x$ ) у певний момент часу. Система вважається замкненою та стаціонарною та забезпечує “жертв” всім необхідним для існування, тоді як “хижаки” можуть житись лише “жертвами”. Ні жертви, ні хижаки не емігрують із середовища, також жодні інші тварини не мігрують у цей ареал проживання. Модель не враховує вимирання тварин унаслідок старіння та інших зовнішніх впливів.

Динаміка кількості жертв у такому середовищі описуватиметься рівнянням:

$$dx/dt = (a - b*y)*x$$

де:  $a$  - параметр, що характеризує ймовірність розмноження жертв

$b$  - параметр, що характеризує ймовірність загибелі жертви від хижака

Динаміка кількості хижаків описуватиметься наступним рівнянням:

$$dy/dt = (c - d*y)*x$$

$c$  - параметр, що характеризує ймовірність смерті хижака від голоду

$d$  - параметр, що характеризує ймовірність розмноження хижаків

Із системи рівнянь випливає, що якщо жертв немає ( $x = 0$ ), то хижаки вимиратимуть експоненціально з заданим початковим коефіцієнтом. За відсутності хижаків спостерігатиметься експоненційне зростання чисельності жертв. За усіх інших умов відбуватиметься динамічна взаємодія, характер якої залежить від закладених в основу моделі параметрів. Саме проміжні стани системи є найцікавішими для

дослідження, адже чітке кількісне визначення “червоних ліній”, поза якими починається деградація екосистеми є найбільш важливим для практики створення заповідних територій.

На рисунку 3 наведена схема базової моделі “Predator Prey”, що поставляється разом з програмою. Жертви представлені тут популяціями зайців, а хижаки — рисями. Студентам пропонується створити модель з аналогічною структурою, але з різними кількісними параметрами, які видаються викладачем по варіантах [26, 27].

На першому етапі створюються два накопичувачі з заданими початковими значеннями популяції зайців і рисей. На схемі вони позначені квадратиками та підписані як Hares і Lynx. У базовій моделі на початку моделювання популяція зайців становить 6000 осіб, а популяція рисей - 125 осіб.

Далі до них доєднують потоки, що позначаються стрілками, які вказують напрямом “входу” та “виходу” особин у популяціях (накопичувачах). На рис. 3 кожна популяція регулюється природними потоками: народжуваності (HareBirth та LynxBirth) і смертності (HareDeaths та LynxDeaths) тварин.

На другому етапі додаються “параметри” або “динамічні змінні”, що регулюють вказані потоки — коефіцієнти, які характеризують ймовірність розмноження та загибелі жертв і хижаків. На рисунку 3 вони позначені невеличкими колами та відповідними підписами (HareNatality, LynxNatality та інші). Усі параметри з'єднуються з потоками за допомогою “зв'язків”, що вказують причинно-наслідкові залежності у моделі та позначаються стрілочками.

Важливою особливістю моделі є можливість динамічної зміни всіх “параметрів” безпосередньо під час моделювання у широкому діапазоні значень. Для цього у схему до відпо-

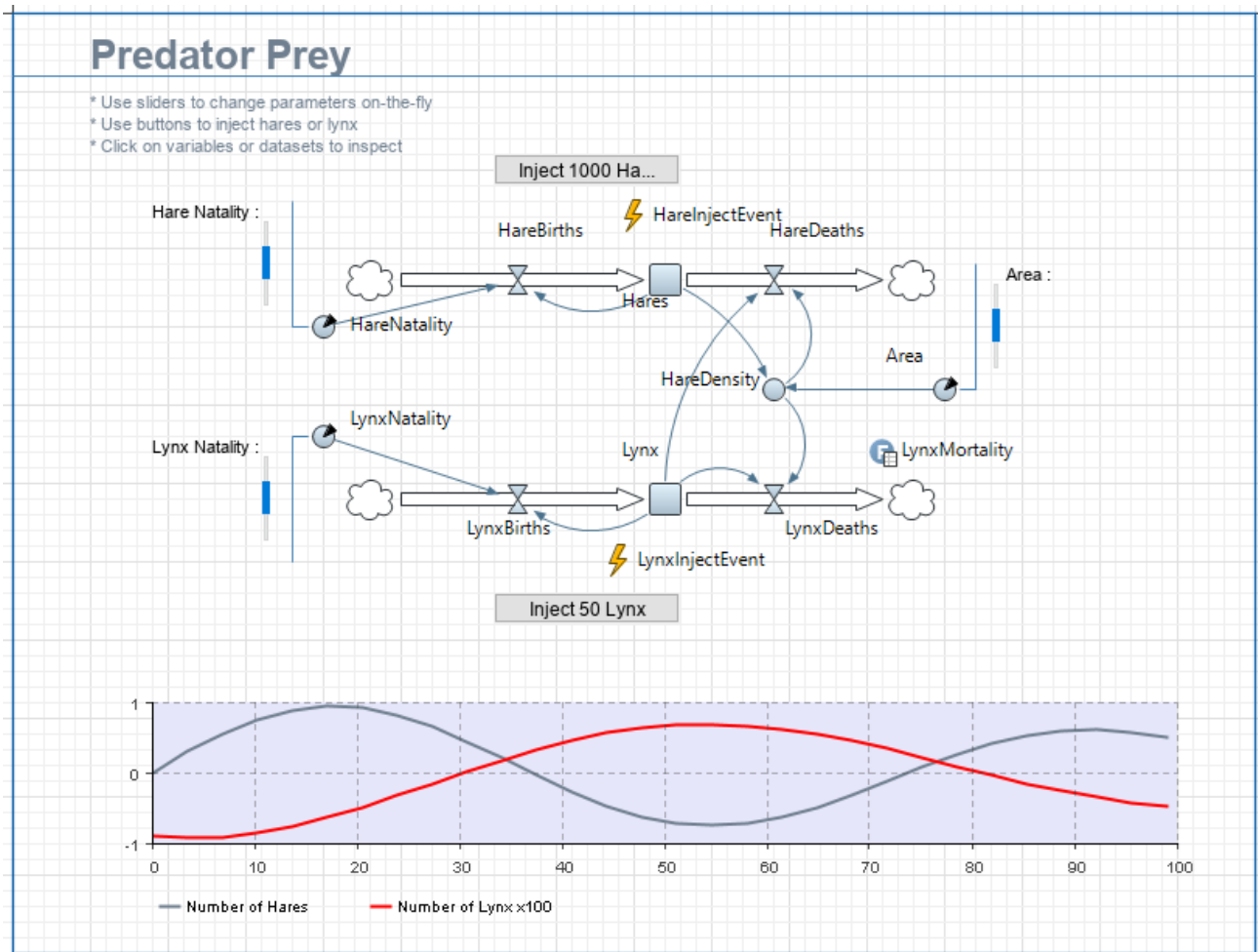


Рис. 3 – Структура моделі «хижак-жертва» (створено за допомогою платформи AnyLogic [23])

Fig. 3 – Structure of the “predator-prey” model (created using the AnyLogic platform [23])

відних параметрів додаються “повзунки”. На рис. 3 таким чином можуть регулюватись народжуваність зайців (HareNatality), народжуваність рисей (LynxNatality) та площа проживання популяцій (Area).

На третьому етапі вказуємо найголовніше – зворотні зв’язки, які існують між популяціями жертв і хижаків та забезпечують стійкість даній системі для стаціонарних умов навколишнього середовища. Логіка проста: чим більше стає жертв, тим більше стає ймовірність їх зустрічі з хижаком. Відповідно, легкість тримання їжі призводить до зростання популяції лисиць й до скорочення популяції зайців. Через певний час популяція жертв знижується до рівня при якому хижакам стає важче знайти здобич, відповідно починається

скорочуватись тепер вже популяція лисиць, а зайців стає більше. Таким чином формується стійкий зворотній негативний зв’язок між хижаками та жертвами, який обумовлює саморегуляцію вказаної системи.

На четвертому й останньому етапі складання схеми відбувається додавання часових графіків, які візуалізують результати моделювання. На рис. 3 у схему доданий лише один графік, що відображає зміну чисельності популяцій, при цьому для його наочності кількість рисей відображається як помножена на 100. Після запуску моделі на виконання відкривається нове операційне вікно у якому у динамічному режимі показується хід процесу (рис.4).

У цьому випадку модель розрахована на термін 100 років. Після запуску, на графіку,

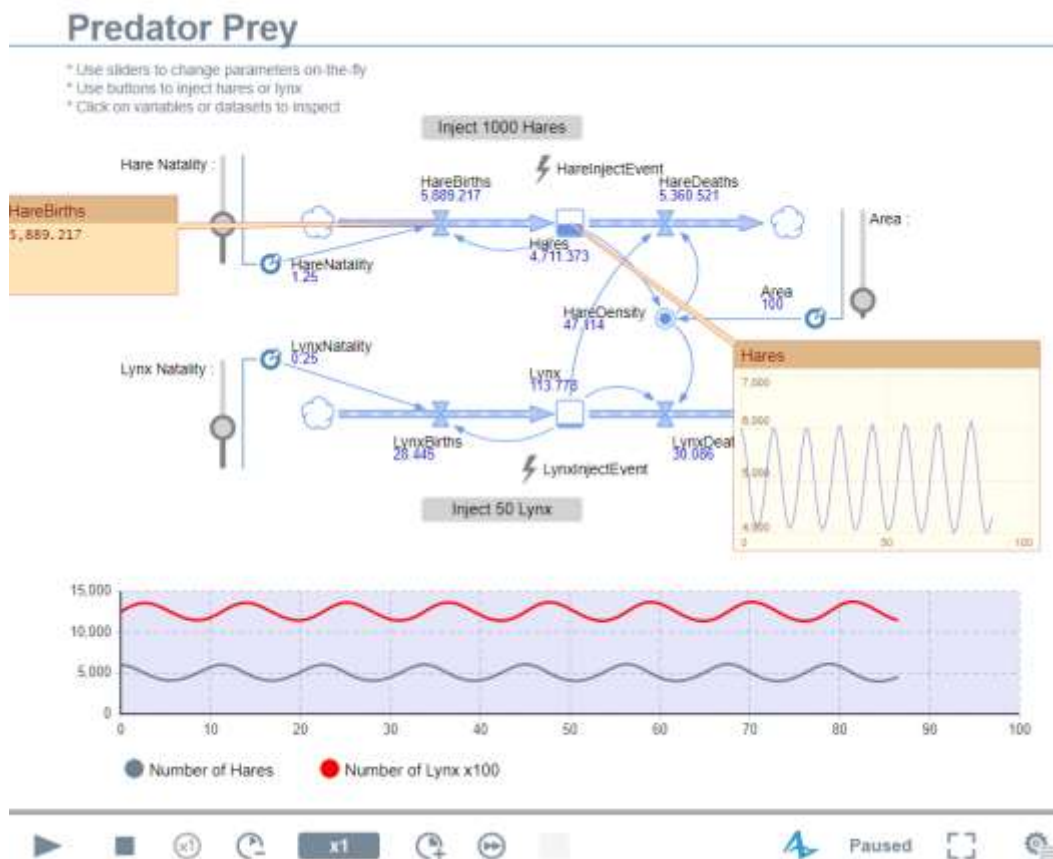


Рис. 4 – Процес виконання моделі «хижак-жертва»  
(створено за допомогою платформи AnyLogic [23])

Fig. 4 – The process of implementing the “predator-prey” model  
(created using the AnyLogic platform [23])

що розташований внизу рисунку можна спостерігати динамку процесу моделювання системи “хижак-жертва”. Є можливість прискорення або уповільнення фізичного часу виконання моделі. Динаміка кожного елемента моделі може бути переглянута на додаткових графіках або таблицях [28].

Представлений циклічний взаємозв'язок між хижаками та жертвами у моделі Лотки-Вольтерра відображає ключові аспекти динаміки популяцій у природних екосистемах. Цей цикл є результатом взаємодії між чисельністю обох видів і впливу одного на інший. Починаючи зі збільшення чисельності хижаків, зростає рівень споживання, оскільки більше хижаків потребує більше їжі для виживання та роз-

множення. Збільшення рівня споживання хижаків призводить до зменшення кількості жертв, через те, що вони стають більш вразливими та менш доступними для хижаків. У зв'язку зі зменшенням кількості доступної їжі, хижаки також починають зменшуватися. Це може бути зумовлено нестачею ресурсів для утримання великої популяції хижаків. Після зменшення кількості хижаків, популяція жертв може почати відновлюватися, оскільки тепер менше хижаків полює на них. Зі збільшенням популяції жертв знову збільшується доступна їжа для хижаків, що може призвести до нового зростання чисельності хижаків.

Цей цикл продовжується, створюючи коливання в чисельності обох популяцій. Ці

циклічні зміни в чисельності властиві системам "хижак-жертва" і вказують на те, як взаємодія між видами може впливати на стабільність та динаміку екосистем.

Внесемо зміни хід моделювання шляхом різкого зростання народжуваності зайців та рисей. На рисунку 5 репрезентовані результати прогнозу зміни популяцій на 100 років за трьома сценаріями розвитку подій. Перші 30 років моделювання відбувається за початковими установками системи. Період з 30-го року по 60-й рік характеризує ситуації, коли різко збільшився коефіцієнт народжуваності жертв. Останній період, від 60-го року до 100-го року, показує зміни які відбулись при збільшенні народжуваності хижаків удвічі.

Результати аналізу доводять, що кожного разу система виводиться зі стану рівноваги, але з часом повертається до нього з вже іншими стабільними параметрами. Відмітимо

зручність перегляду результатів прогнозування, адже динамічна візуалізація процесу дає змогу виявити помилки під час створення схеми та перевірити адекватність моделі [29].

Додатковою опцією моделі "Predator Prey" є можливість уведення у систему додаткової кількості особин будь-якої з популяції відповідними кнопками: HareInjectEvent і LynxInjectEvent. На рисунку 6 представлений результат моделювання у випадку миттєвого "додавання" певної кількості хижаків. Так, після 50-го року до системи було уведено додатково 100 рисей. Проте навіть за таких умов гомеостаз цієї замкненої ідеальної системи остаточно порушити не вдалось. Звісно можна створити умови за яких система втратить баланс і буде зруйнована, саме про такі "червоні лінії" йшлося на початку.

Відмітимо важливу деталь. Для створення подібних моделей студенту немає потреби бути

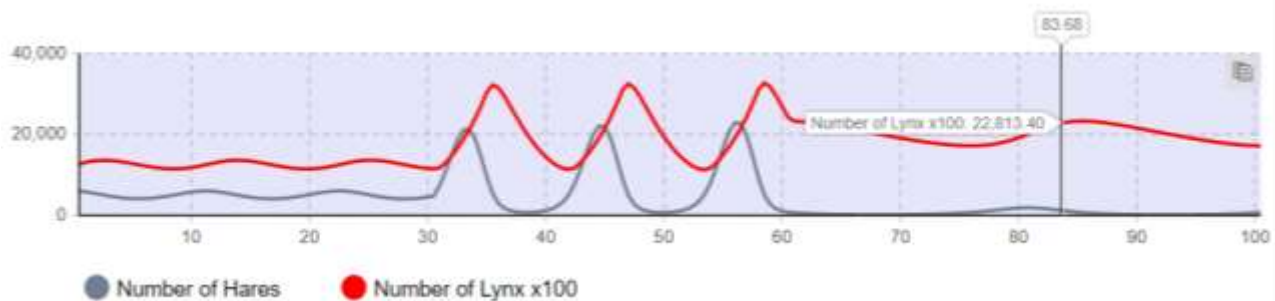


Рис. 5 – Результати моделювання моделі «хижак-жертва» за різними сценаріями народжуваності (створено за допомогою платформи AnyLogic [23])

Fig. 5 – Simulation results of the "predator-prey" model under different fertility scenarios (created using the AnyLogic platform [23])

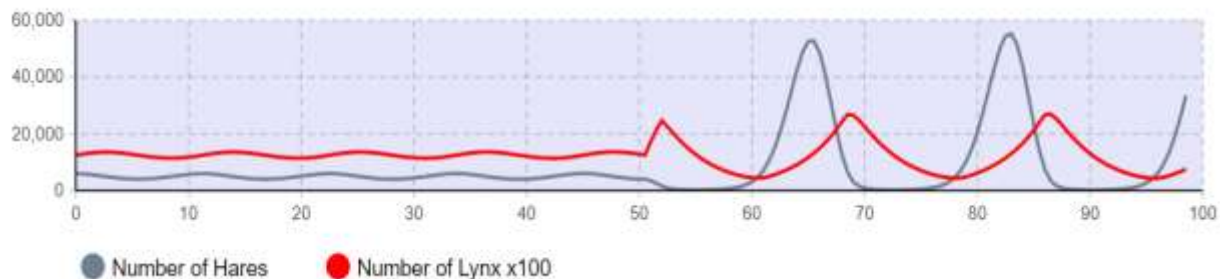


Рис. 6 – Результати моделювання моделі «хижак-жертва» за сценарієм появи додаткової кількості хижаків (створено за допомогою платформи AnyLogic [23])

Fig. 6 – Simulation results of the "predator-prey" model under the scenario of the appearance of an additional number of predators (created using the AnyLogic platform [23])



обізнаними у мовах програмування. Попри те, що в основі програми лежить мова Java користувач застосовує метод візуального програмування. Тобто побудова ієрархій структури та поведінки активних об'єктів виконується за допомогою графічних об'єктів та піктограм. Схема моделі формується в графічному редакторі, який дозволяє значно спростити роботу.

Іншим позитивним моментом є інтерактивність програми. Під час моделювання користувачі можуть спостерігати хід процесу, змінювати параметри моделі, виводити результати моделювання в різних формах і проводити різноманітні комп'ютерні експерименти з моделлю.

### Висновки

Використання комп'ютерного моделювання у навчальному процесі є надзвичайно важливим для студентів екологічних спеціальностей. Підготовка студентів екологічних спеціальностей не може вважатися повною без надання їм знань і практичних навичок стосовно комп'ютерного моделювання та прогнозування стану довкілля. На ринку існують принаймні дві комп'ютерні програми імітаційного моделювання, які мають вільні версії для студентської освіти: VensimPLE й AnyLogicPLE. Досвід використання цих програмних продуктів свідчить про корисність їх застосування у навчальному процесі для опанування студентами основ імітаційного моделювання взагалі та системної динаміки зокрема. Також визначено, що AnyLogic має дружній інтерфейс користувача, широкий спектр інструментів для розробки моделей, візуалізації прогнозу та

Отже, вказані програмні продукти дозволяють студентам опанувати теоретичні та практичні аспекти імітаційного моделювання та власноруч будувати різноманітні моделі. Зокрема на подальших етапах навчання, залежно від уподобань студентів пропонується розробити такі моделі: «Гаманець», «Демографічні ресурси країни», «Деградація земельних ресурсів», «Коронавірус» й т.д. Подальшим розвитком отриманих знань та вмінь може стати виконання проектних завдань в рамках курсової або дипломної роботи для конкретних екологічних проблем [30].

аналізу, що робить цей продукт зручним і доступним для початківців. Під час використання цих програмних продуктів, студенти можуть спостерігати процес моделювання, змінювати параметри моделі, аналізувати результати моделювання та проводити різноманітні комп'ютерні експерименти. Як приклад, у роботі запропонована відома в класичній екології модель «хижак-жертва», яка дає можливість досліджувати різні варіанти розвитку подій при зміні вхідних параметрів у моделі. Важливо зазначити, що при використанні VensimPLE й AnyLogicPLE не потрібно мати глибокі знання у програмуванні. Застосування методу системної динаміки дає змогу будувати стратегічні імітаційні моделі, необхідні для ухвалення управлінських рішень у сфері природоохоронної діяльності та раціонального використання ресурсів.

### Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що робота виконувалась в рамках науково-дослідницької роботи No 1-43-22 «Стратегія й інноваційні технології переробки органічних відходів тваринництва в контексті забезпечення нейтральної деградації земель: від лінійної до циркулярної економіки». Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

### Список використаної літератури

1. Hlushak, O.M., Semenyaka, S.O., Proshkin, V.V., Sapozhnykov, S.V. and Lytvyn, O.S., 2020. The usage of digital technologies in the university training of future bachelors (having been based on the data of mathematical subjects). *CTE Workshop Proceedings* [Online]. Vol. 7. P. 210–224. DOI: <https://doi.org/10.55056/cte.354>

2. Pollock L.J., O'Connor L.M.J., Mokany K., Rosauer D.F., Talluto M.V., Thuiller W. Protecting biodiversity (in all its complexity): new models and methods. *Trends in Ecology & Evolution*. 2020. Vol. 35. N 12. P.1119-1128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2020.08.015>
3. Душечкіна Н. Вплив системи еколого-педагогічної освіти на формування екологічного світогляду здобувачів-екологів. *Педагогічні науки: теорія, історія, інноваційні технології*. 2022. Т.1. № 115. С.13-28. DOI: <https://doi.org/10.24139/2312-5993/2022.01/013-028>
4. Клочко О.В., Федорець В.М., Клочко В.І. Цифрове імітаційне моделювання екологічної свідомості студентів на основі аналізу ризиків прояву екофобних тенденцій. *Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання в підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми*. 2021. Т. 60. С.232-246. DOI: <https://doi.org/10.31652/2412-1142-2021-60-232-247>
5. Кремень В.Г. Методологічні засади використання інформаційно-комунікаційних технологій в сучасній освіті. *Інформаційно-комунікаційні технології в сучасній освіті: досвід, проблеми, перспективи*. 2017. Т. 5. 3-9.
6. Гуревич Р.С., Кадемія М.Ю., Опушко Н.Р. Цифрові технології в закладах вищої освіти: виклики сучасного суспільства. *Abstracts of the 5th International scientific and practical conference*. SSPG Publish. Stockholm, Sweden. 2020. P. 246-252. URL: <https://scicong.com.ua/v-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-modernscience-problems-and-innovations-26-28-iyulya-2020-goda-stokholm-shvetsiyaarhiv/>
7. Haleema A., Javaida M., Qadri M.A., Sumanc R. Understanding the role of digital technologies in education. *Sustainable Operations and Computers*. 2022. Vol. 3. P.275-285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.05.004>
8. On approval of the standard of higher education in specialty 101 "Ecology" for the first (bachelor's) level of higher education. 2018. Order No. 1076 dated 04.10.18. URL: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/vishcha-osvita/zatverdzeni%20standarty/12/21/101-ekologiya-magistr.pdf>
9. Мандрик О.М., Мальований М.С., Орфанова М.М. Екологічна освіта та екологічне виховання. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2019. Т. 10. № 1. С.130-139. DOI: [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2019-1\(19\)-130-139](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2019-1(19)-130-139)
10. Ситник В. Ф., Орленко Н. С. Імітаційне моделювання: Навч.-метод. посібник для самост. вивч. дисц. К.: КНЕУ, 1999. 208 с.
11. Zatsepina M., Popova O., Filippova A., Muskhanova I., Yakhyaeva A., Ishmuradova A. Conditions and technologies of students ecological culture formation. *Eurasian Journal of Analytical Chemistry*. 2017. Vol. 12. P.673-683. DOI: <https://doi.org/10.12973/ejac.2017.00201a>
12. Нічишина В.В. Про математичне моделювання екологічних процесів як засіб розвитку екологічної культури особистості учня загальноосвітньої школи. *Наукові записки. Серія: Педагогічні науки*. 2021. Т.198. С.145-148. DOI: <https://doi.org/10.36550/2415-7988-2021-1-198-145-148>
13. Бачинський Г. О. Математико-картографічне моделювання соціоекосистем – провідний метод прикладної соціоекології. *Проблеми урбоекології: темат. зб. наук. праць*. Київ: НОК ВО, 1992. 160 с.
14. Вітлінський В. В., Коляда Ю.В., Трохановський В.І. Моделювання процесів функціонування навчального закладу щодо надання освітніх послуг. *Наукова складова навчального процесу та інноваційні технології його розвитку: зб. матеріалів наук.-метод. конф. 12 квіт. 2011 р.* Київ: КНЕУ, 2011. Т. 2. с. 571–573. URI <https://ir.kneu.edu.ua:443/handle/2010/10229>
15. Качинський А.Б. Безпека складних систем: математичне моделювання небезпечних процесів і системний аналіз її забезпечення. К.: «Азимут-Україна», 2016. 498 с.
16. Богобоящий В. В., Курбанов К. Р., Палій П. Б., Шмандій В. М. Принципи моделювання та прогнозування в екології. Київ : Центр навчальної літератури, 2018. 216 с.
17. Власюк Ю.О. Особливості імітаційного моделювання економічних систем. *Збірник наукових праць Таврійського державного агротехнологічного університету (економічні науки)*. 2013. №4(24). С. 303-305. URL: <http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/1344/1/1140.pdf>
18. Ус С. А., Палехова Л. Л. Моделювання сталого розвитку: навч. посіб. Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро : вид-во «Свідлер А.Л». 2024. 160 с.
19. Ouyang H., Cui X., Peng X., Udemba E.N. Reverse knowledge transfer in digital era and its effect on ambidextrous innovation: a simulation based on system dynamics. *Heliyon*. 2023. Vol. 9. N 12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22717>
20. Zhang T., Shaikh Z.A., Yumashev A.V., Chład M. Applied model of e-learning in the framework of education for sustainable development. *Sustainability*. 2020. Vol.12. N 16. P.6420. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12166420>
21. Jay W. Forrester. *Urban Dynamics*. M.I.T. Press, Cambridge, Mass., 1969. 290 p.
22. Фоменко О.О., Чечельницький С.Г. Коефіцієнт екологічного сліду архітектури як фактор формування національних зелених стандартів. *Український журнал будівництва та архітектури*, 2023. No 5 (017). С. 110-119 DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.241023.110.999>
23. Vensim. URL: <https://vensim.com/vensim-personal-learning-edition/>

24. AnyLogic. URL: <https://www.anylogic.com/> <https://the.anylogic.company/contacts/>
25. Mahdavi A. The art of process centric modeling with anylogic. 2020. URL: <https://www.anylogic.com/resources/books/the-art-of-process-centric-modeling-with-anylogic/>
26. Ibarra-Vazquez G., Ramírez-Montoya M.S., Buenestado-Fernández M., Olague G. Predicting open education competency level: a machine learning approach. *Heliyon*. 2023. 9(11). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20597>
27. Lev I., Zimmer M. Predator-prey interactions: Strategic biting. *Current Biology*. 2022. Vol. 32. N 8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.03.026>
28. Malthus T.R. An essay on the principle of population, as it affects the future improvement of society. London: Science; 1798. 324 p.
29. Poggiato G., Münkemüller T., Bystrova D., Arbel J., Clark J.S., Thuiller W. On the interpretations of joint modeling in community ecology. *Trends in Ecology & Evolution*. 2021. Vol.36. N 5. P.391-401. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.01.002>
30. Федулова Л.І. Тенденції розвитку та впровадження цифрових технологій для реалізації цілей сталого розвитку. *Економіка природокористування і сталий розвиток*. 2019.Т. 6. № 25.С. 6-14. DOI: [https://doi.org/10.37100/2616-7689/2019/6\(25\)/1](https://doi.org/10.37100/2616-7689/2019/6(25)/1)

Стаття надійшла до редакції 02.01.2024

Стаття рекомендована до друку 24.05.2024

**A. G. KOT<sup>1</sup>,**

PhD Student of the Department of Ecology and Environmental Management

e-mail: [anna.kot@karazin.ua](mailto:anna.kot@karazin.ua) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4700-2620>

**A. B. ACHASOV<sup>1</sup>,** DSc (Agriculture), Prof.,

Acting Head of the Department of Ecology and Environmental Management

e-mail: [achasov@karazin.ua](mailto:achasov@karazin.ua) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5009-7184>

**O. YU. SELIVERSTOV<sup>1</sup>,**

PhD Student of the Department of Ecology and Environmental Management

e-mail: [oleg.seliverstov@karazin.ua](mailto:oleg.seliverstov@karazin.ua) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8477-274X>

**V. G. KARPOV<sup>1</sup>,**

Associate Professor of the Department of Ecology and Environmental Management

e-mail: [karpov@karazin.ua](mailto:karpov@karazin.ua) ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-9905-0277>

<sup>1</sup>V. N. Karazin Kharkiv National University,  
6, Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

## **SIMULATION MODELING TOOLS IN TRAINING ENVIRONMENTAL SCIENCE STUDENTS**

The use of computer modeling and forecasting for the analysis and prediction of complex systemic processes, particularly in the field of environmental protection, is extremely important. For students of ecological specialties, proficiency in modeling is a key aspect. There are at least two computer simulation programs available on the market with free versions for student education: VensimPLE and AnyLogicPLE. They enable the use of simulation modeling and system dynamics for analyzing and predicting ecological processes. Students are provided with the opportunity to create and study various scenarios using mathematical models. Students are encouraged to create and investigate the "Predator Prey" model, which is based on the Volterra-Lotka system of differential equations. The model describes the dynamics of predator and prey populations in a closed and stationary system. Based on equations that consider the reproduction and mortality of both species, students need to explore the interaction between populations under different input parameters. The model has two stages: initially, accumulators with initial population values are created, then parameters regulating flows are added. Using the example of the provided model, the possibility of studying the impact of various factors on ecosystem dynamics and understanding it more deeply is highlighted.

**Conclusions.** The application of system dynamics methodology allows for the construction of strategic simulation models necessary for making management decisions in the field of environmental protection and rational resource use. This is important for the practical application of students' knowledge in their future professional activities.

Such skills will help them effectively influence the state of the environment and make informed decisions regarding its conservation.

**KEYWORDS:** *computer modeling, forecasting, system dynamics, simulation modeling, environmental science, VensimPLE, AnyLogicPLE*

## References

1. Hlushak, O.M., Semenyaka, S.O., Proshkin, V.V., Sapozhnykov, S.V. & Lytvyn, O.S., (2020). The usage of digital technologies in the university training of future bachelors (having been based on the data of mathematical subjects). *CTE Workshop Proceedings* [Online], 7, 210–224. <https://doi.org/10.55056/cte.354>
2. Pollock, L. J., O'Connor, L. M.J., Mokany, K., Rosauer, D.F., Talluto, M. V. & Thuiller, W. (2020). Protecting biodiversity (in all its complexity): new models and methods. *Trends in Ecology & Evolution*, 35(12), 1119-1128. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2020.08.015>
3. Dushechkina, N. (2022). Influence of the ecological-pedagogical education system on the formation of the ecological worldview of ecology students. *Pedagogical Sciences: Theory, History, Innovative Technologies*, 1(115), 13-28. <https://doi.org/10.24139/2312-5993/2022.01/013-028> (in Ukrainian)
4. Klochko, O.V., Fedorets, V.M., & Klochko, V.I. (2021). Digital simulation modeling of students' ecological consciousness based on the analysis of risks of eco-phobic tendencies. *Modern Information Technologies and Innovative Teaching Methods in the Training of Specialists: Methodology, Theory, Experience, Problems*, 2021, 60, 232-246. <https://doi.org/10.31652/2412-1142-2021-60-232-247> (in Ukrainian)
5. Kremen, V.G. (2017). Methodological principles of using information and communication technologies in modern education. *Information and Communication Technologies in Modern Education: Experience, Problems, Prospects: Collection of Scientific Works*, 5, 3-9. (in Ukrainian)
6. Gurevich, R.S., Kademiya, M.Y., & Opushko, N.R. (2020). Digital technologies in higher education institutions: challenges of modern society. *The 5th International scientific and practical conference – Modern science: problems and innovations*. Stockholm, Sweden. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2020/07/MODERN-SCIENCE-PROBLEMS-AND-INNOVATIONS-26-28.07.20.pdf> (in Ukrainian)
7. Haleema, A., Javid, M., Qadri, M. A. & Sumanc, R. (2022). Understanding the role of digital technologies in education. *Sustainable Operations and Computers*, 3, 275-285. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.05.004>
8. On approval of the standard of higher education in specialty 101 "Ecology" for the first (bachelor's) level of higher education. (2018). Order No. 1076 dated 04.10.18. Available from: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/vishcha-osvita/zatverdzeni%20standarty/12/21/101-ekologiya-magistr.pdf>
9. Mandryk, O.M., Malovanyi, M.S., & Orfanova, M.M. (2019). Environmental education and environmental upbringing. *Environmental Safety and Sustainable Resource Use*, 10(2), 130-139. [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2019-1\(19\)-130-139](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2019-1(19)-130-139) (in Ukrainian)
10. Sytnyk V.F., & Orlenko N.S. (1999). Simulation modeling. Kyiv: KNEU
11. Zatssepina, M., Popova, O., Filippova, A., Muskhanova, I., Yakhyaeva, A. & Ishmuradova, A. (2017). Conditions and technologies of students' ecological culture formation. *Eurasian Journal of Analytical Chemistry*, 12, 673-683. <https://doi.org/10.12973/ejac.2017.00201a>
12. Nichishina, V.V. (2021). On mathematical modeling of ecological processes as a means of developing the ecological culture of school students. *Scientific Notes. Series: Pedagogical Sciences*, 198, 145-148. <https://doi.org/10.36550/2415-7988-2021-1-198-145-148> (in Ukrainian)
13. Bachynskyi, G. O. (1992). Mathematical and cartographic modeling of socio-ecosystems – a leading method of applied socioecology. *Problems of urboecology*. Kyiv: NOK VO. (in Ukrainian)
14. Vitlinskyi, V.V., Kolyada, Yu.V. & Trokhanovskyi, V.I. (2011). Modeling of educational institution functioning processes regarding the provision of educational services. Proceedings of the science and method. conf.: The scientific component of the educational process and innovative technologies of its development, (April 12 2011), Kyiv: KNEU, 2, 571–573. URI <https://ir.kneu.edu.ua:443/handle/2010/10229> (in Ukrainian)
15. Kachynsky, A.B. (2016). Security of complex systems: mathematical modeling of dangerous processes and system analysis of its support. Kyiv: "Azimut-Ukraine". (in Ukrainian)
16. Bogoboyachy, V. V., Kurbanov, K. R., Palii, P. B. & Shmandiy, V. M. (2018). Principles of modeling and forecasting in ecology. Kyiv: Center for Educational Literature. (in Ukrainian)

17. Vlasyuk, Yu.O. (2013). Features of simulation modeling of economic systems. *Collection of scientific works of Tavriyya State Agro-Technological University (Economic Sciences)*. (4(24)). 303 - 305. <http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/1344/1/1140.pdf> (in Ukrainian)
18. Us, S. A. & Palekhova, L. L. (2024). Modeling of sustainable development: training manual National technical "Dniprovsk Polytechnic" University. Dnipro: "Svidler A.L."
19. Ouyang, H., Cui, X., Peng, X., & Udemba, E. N. (2023). Reverse knowledge transfer in the digital era and its effect on ambidextrous innovation: A simulation based on system dynamics. *Heliyon*, 9(12). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22717>
20. Zhang, T., Zaffar, A. S., Yumashev, A.V. & Chład, M. (2020). Applied Model of E-Learning in the Framework of Education for Sustainable Development. *Sustainability*, 12(16), 6420. <https://doi.org/10.3390/su12166420>
21. Forrester, Jay W. (1969). *Urban Dynamics*. M.I.T. Press, Cambridge, Mass.
22. Fomenko, O.O. & Chechelnytsky, S.G. (2023). The ecological footprint coefficient of architecture as a factor in the formation of national green standards. *Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*, (5(017)), 110-119. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.241023.110.999> (in Ukrainian)
23. Vensim. <https://vensim.com/vensim-personal-learning-edition/>
24. AnyLogic. <https://www.anylogic.com/> <https://the.anylogic.company/contacts/>
25. Mahdavi, A. (2020). The Art of Process Centric Modeling with Anylogic. <https://www.anylogic.com/resources/books/the-art-of-process-centric-modeling-with-anylogic/>
26. Ibarra-Vazquez, G., Soledad Ramírez-Montoya, M., Buenestado-Fernández, M., & Olague G. (2023). Predicting open education competency level: A machine learning approach. *Heliyon*, 9(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20597>
27. Lev, I. & Zimmer, M. (2022). Predator–prey interactions: Strategic biting. *Current Biology*, 32(8). <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.03.026>
28. Malthus, T.R. (1798). *An Essay on the Principle of Population, as it affects the future improvement of society*. London: Science.
29. Poggiato, G., Münkemüller, T., Bystrova, D., Arbel, J., Clark, J. S. & Thuiller, W. (2021). On the Interpretations of Joint Modeling in Community Ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 36(5), 391-401. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.01.002>
30. Fedulova, L.I. (2020). Trends in the development and implementation of digital technologies for achieving sustainable development goals. *Economics of Nature Management and Sustainable Development*, 7(2.6), 6-14. [https://doi.org/10.37100/2616-7689/2019/6\(25\)/1](https://doi.org/10.37100/2616-7689/2019/6(25)/1) (in Ukrainian)

The article was received by the editors 02.01.2024

The article is recommended for printing 24.05.2024