

# ЕКОЛОГІЯ

УДК 574.3:519.673

doi: 10.25128/2078-2357.23.1–2.8

<sup>1</sup>І. М. ГРОД, <sup>1</sup>Л. О. ШЕВЧИК, <sup>1</sup>Г. М. ГОЛШЕЙ, <sup>2</sup>Н. Я. КРАВЕЦЬ, <sup>1</sup>О. Л. ГЛАВАЦЬКА

<sup>1</sup>Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка  
вул. М. Кривоноса, 2, Тернопіль, 46027

<sup>2</sup>Тернопільський національний медичний університет імені І. Я. Горбачевського  
вул. Ю. Словацького, 2, м. Тернопіль, 46001  
e-mail: grodin@tnpu.edu.ua

## **АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ЧИСЕЛЬНОСТІ ПОПУЛЯЦІЇ КАБАНА ДИКОГО *SUS SCROFA* (LINNAEUS, 1758) У РАМКАХ МОДЕЛІ ФЕРХЮЛЬСТА**

---

У статті йдеться про прийняття комп'ютерного моделювання як одного із провідних напрямів впровадження засобів сучасних інформаційних технологій у модернізацію змісту, форм і методів оцінки впливу на довкілля (ОВД), спрямованого на виявлення характеру, інтенсивності і ступеня небезпеки впливу будь-якого виду господарської діяльності на стан довкілля і здоров'я населення.

Задля реалізації інтегрованого вивчення біорізноманіття виявлено можливості міжпредметної інтеграції досліджень, проаналізовано практику застосування програмних середовищ у процесі моделювання біологічних задач на основі математичних моделей, досліджено можливості реалізації алгоритмів математичних моделей у процесі комп'ютерного моделювання. Доведено ефективність впровадження комплексу дослідницьких завдань з біології як основи реалізації міжпредметної інтеграції: природа – математика – інформатика. Для проектування комп'ютерної моделі відтворення екологічного процесу була використана математична модель Ферхюльста. Її реалізація здійснювалась із використанням середовища програмування «Python». Доцільність запропонованої методики обґрунтовано через розвивально-продуктивний інтегрований підхід, а саме практичне спрямування комп'ютерного моделювання математичних моделей для вивчення біологічних процесів.

*Ключові слова:* комп'ютерне моделювання, математична модель, мисливська фауна, оцінка впливу на довкілля, біологічні процеси, популяція.

Зміна клімату, інтенсивна господарська діяльність, забруднення та вирубування лісів, а отже руйнування природних середовищ існування тварин, полювання й інші антропогенні фактори є основними чинниками зменшення біорозмаїття фауни [6].

Якщо фауна ссавців України загалом нараховує 152 види [11], а до переліку мисливських звірів різні автори відносять від 31 виду то до мисливської теріофауни України 2015 року віднесено 29 видів [2]. Оскільки кожний окремий вид, чи навіть особина, є невіддільною структурною одиницею багатьох живих систем – колоній, стад, популяцій, біогеоценозів, ландшафтних екосистем, біосфери, – усі вони мають бути включені до блоку регуляторів життєздатності як популяцій, так і інших екосистем. Тому питання обліку та використання ресурсів теріофауни загалом і мисливської зокрема є актуальним і потребує вдосконалення

методичних підходів із точки зору забезпечення переходу ведення мисливського господарства на популяційну основу [18].

Особливе місце серед заходів розширення мисливської галузі в Україні посідає законотворча діяльність. Починаючи з 2020 року, було прийнято Закон України «Про мисливське господарство та полювання» [17], поряд із яким розроблено проєкт розпорядження КМУ «Про схвалення Концепції сталого розвитку мисливського господарства в Україні на період 2021–2025 рр.» №1478-III [5]. Як наслідок, з метою оцінки втрат мисливських господарств через російську збройну агресію в Україні, а саме знищення або пошкодження біотехнічних споруд та загибелі тварин, а також оцінки втрачених можливостей України Міністерством захисту довкілля та природних ресурсів України прийнято Наказ № 414 від 05.10.2022 (нині чинний) «Про затвердження Методики визначення шкоди та збитків, заподіяних лісовому фонду внаслідок збройної агресії Російської Федерації» [15]. Сьогодні мисливство орієнтується на широке впровадження сучасних інформаційних технологій та передбачає модернізацію змісту, форм і методів оцінки стану довкілля, тобто вже зараз проявляється стійка тенденція до прийняття комп'ютерного моделювання одним із провідних напрямів у дослідженнях біологічних систем.

Жодне дослідження, зокрема і з біології та екології, не може бути повним і точним, якщо воно не супроводжується побудовою хоча б найпростішої, але все ж таки математичної моделі досліджуваного об'єкту чи процесу. При цьому, чим складнішим є об'єкт чи процес, який розглядається, тим складніше знайти математичні абстракції, які підходять для його опису.

Вивчення закономірностей динаміки чисельності популяцій мисливських тварин необхідне для раціонального використання природних ресурсів, що обов'язково передбачає використання математичних методів, зокрема, комп'ютерного моделювання. Загалом, на сьогодні актуальною залишається тема розробки адекватного математичного апарату для оцінки впливу на довкілля.

Важливо звернути увагу на внесок наукової спільноти у вирішення цієї проблеми. Видове представлення та чисельність диких тварин на території України вивчали А. М. Волох (2004), В. Домніч (2008), С. Межжерін (2008) [4, 9, 14]. Останнім часом активно розширюється перелік застосовуваних у мисливстві нових методик та методів дослідження. Усе частіше вчені (І. Синякевич, 2011 та О. Виноградський, 2022) працюють на стику наук, супроводжуючи польові дослідження побудовою математичних моделей динаміки популяцій, що неможливо без урахування впливу короткострокових та довготривалих чинників на ростові процеси [3, 19].

Задля цього, ставлячи «дослідницькі завдання», науковці вивчають особливості застосування технологій комп'ютерного моделювання у дослідженні діяльності екосистем. Термін «дослідницьке завдання» визначається як комплекс дій, призначених для виконання. У науковій літературі немає однозначного підходу до визначення цього поняття, адже «дослідницьке завдання» містить проблему, вирішення якої вимагає проведення теоретичного аналізу, застосування одного або декількох методів наукового дослідження, за допомогою яких відкриють раніше невідомі знання [12].

У процесі пізнання світу вчені все частіше застосовують моделювання як універсальний метод наукового пізнання, що базується на побудові, дослідженні та використанні моделей об'єктів і явищ. Найбільш важливим різновидом моделювання є математичні моделі [13]. Поряд із традиційними галузями використання математики, до її сфери все частіше залучається біологія.

Математичне моделювання передбачає вміння програмувати, активно використовувати знання з природничо-наукових дисциплін із подальшим їх застосуванням у різних галузях людської діяльності для одержання нових знань [20]. Дослідницькі завдання не є новиною, але методика їх розгляду ще недостатньо вивчена, що обумовлено великою трудомісткістю проведення експериментів, які є невід'ємною складовою дослідження [10].

Моделювання динаміки популяцій застосовується для вирішення актуальних сьогодні завдань, а саме: збереження зникаючих і рідкісних видів, прогнозування чисельності промислових популяцій, розроблення оптимальних стратегій промислу, вивчення впливу антропогенних факторів на чисельність біологічних видів тощо.

Процес вивчення динаміки популяцій пов'язаний із побудовою різних моделей чисельності, які часто є емпіричними і вимагають додаткового обґрунтування або підбору невідомих параметрів. Розроблений метод прогнозування на базі моделі ARIMA, який реалізований у вигляді програмного додатку, що виконує прогнозування чисельності популяції на основі щорічних даних моніторингу [8].

Цікавими є дослідження в галузі математичного моделювання, пов'язані із застосуванням до екологічних систем матричної моделі Леслі [21].

Процес моделювання динаміки популяції залежить, як правило, від двох основних компонент: хороший блок експериментальних даних і ґрунтовні знання екології.

Не існує жодної популяції, чисельність якої не зазнавала б змін. Дискретні значення цієї величини можуть бути отримані з експериментальних даних (лабораторних або польових). У роботах із дослідження динаміки популяцій використовують різні моделі (модель Мальтуса, модель Ферхюльста, модель Леслі [7], модель Рікера, тощо), які можуть, із тими чи іншими поправками, бути використані як основні для прогнозування чисельності окремої популяції. Відомо, що біологічні параметри популяції з плином часу змінюються під впливом кліматичних умов, обмеженості кормових ресурсів та інших факторів довкілля. Після аналізу особливостей різних моделей була вибрана модель Ферхюльста.

Метою роботи є аналіз динаміки чисельності популяцій мисливських тварин із врахуванням різних факторів навколишнього середовища, дослідження та висвітлення проблем популяційної динаміки кабана дикого *Sus scrofa* (Linnaeus, 1758) за допомогою моделі Ферхюльста.

Завдання:

- вивчити і проаналізувати літературні джерела за тематикою дослідження;
- розглянути прийоми застосування комп'ютерного моделювання для вирішення задач моделювання динаміки популяцій;
- розробити комп'ютерну модель, яка дає інформацію про моделюючий об'єкт (оригінал).

Побудувати модель на основі одного із рівнянь популяційної динаміки, використовуючи знання про екологію виду (табл. 1), і розрахувати прогноз розвитку популяції на 7 років, враховуючи рівень браконьєрства і різну оцінку щільності угідь.

Таблиця 1

Динаміка чисельності кабана дикого у лісництвах ДП «Чортківське лісове господарство»

Лісництва	Площа, га	Загальна кількість тварин				
		2019	2020	2021	2022	2023
Копичинське	330	3	6	10	12	16
Білецьке	1338	37	64	35	29	34
Улашківське	1147	8	10	14	13	16
Коліндянське	2358	1	1	4	6	7
Скала-Подільське	436	4	7	6	10	13
Борщівське	538	14	11	9	8	10
Гермаківське	905	29	21	18	14	18
Більче-Золотецьке	600	7	5	11	12	14
Наддністрянське	1033	12	16	20	20	22
<i>Всього</i>	8685	115	141	127	124	150
<i>Середнє</i>	1044,4	12,8	15,7	14,1	13,8	16,7

### Матеріали та методи досліджень

Дослідження динаміки популяції проводилося з використанням моделі Ферхюльста. Ідея Ферхюльста полягала в накладанні на експоненційний ріст, який виражений формулою, **деякого фактору**, що характеризує уповільнення, і який збільшується з ростом популяції. Найпростіше із можливих припущень полягає в тому, що степінь уповільнення росту для однієї особини пропорційний розміру популяції, тобто загальна швидкість росту рівна не  $r$ , а  $r(1 - N/K)$ , і визначає уповільнення росту. У цьому випадку логістичне диференціальне рівняння

набуде наступного вигляду  $\frac{dN}{dt} = rN - \frac{rN^2}{K} = rN \left(1 - \frac{N}{K}\right)$ , а його розв'язок виражається формулою  $N(t) = \frac{N_0 K e^{rt}}{K - N_0 + N_0 e^{rt}} = \frac{K}{1 + \left(\frac{K}{N_0} - 1\right)e^{-rt}}$ .

Враховуючи, що для реальної моделі деякі параметри в цій формулі також можуть залежати від часу і ця залежність не може бути виражена в аналітичному вигляді, використання розрахунків за рекурентною формулою є більш сприятливим варіантом  $N_{t+1} = N_t \left[1 + r \left(1 - \frac{N_t}{K}\right)\right]$ .

Тут  $K$  – константа, яка позначає верхню границю збільшення чисельності популяції і називається верхньою асимптотою для  $S$ -подібної кривої. Величину  $K$  також називають гранично допустимим навантаженням на середовище або щільністю угідь для даної популяції. Ітераційний крок для розрахунків – 1 рік.

Розподіл популяції рідко буває однорідним. Відповідно, облік неоднорідності дозволяє більш точно змодельовати процес. Норма відтворення тісно пов'язана з народжуваністю (наявністю і розподілом самок, здатних народжувати), норми смертності залежать від того, як розподілені особини з різних вікових груп, рівень браконьєрства також залежить від території, коефіцієнти внутрішньовидової конкуренції залежать від щільності і максимальна ємність угідь, очевидно, неоднорідно розподілена.

Популяційні параметри кабана дикого, необхідні для розрахунків параметрів моделі, були отримані завдяки працям [1, 11, 18]. На основі даних були сформовані просторові шари: щільність розподілу популяції кабанів (у перерахунку кількості особин на 1 га), щільність розподілу представників різних вікових груп (самці, самки, поросята), щільність розподілу максимальної ємності угідь. Для реалізації моделі скрипти написані мовою Python.

Грид – це географічно розподілена інфраструктура, яка об'єднує множину різних типів, доступ до яких користувач може отримати з будь-якої точки, незалежно від місця їх розміщення.

Формально розрахунок по моделі Ферхюльста з урахуванням просторового розподілу всіх параметрів виглядає так:

$$N(t+1) = \sum_{i=0}^m N(t)_i * \left\{ 1 + \sum_{i=0}^m r(t)_i * \left\{ 1 - \frac{\sum_{i=0}^m N(t)_i}{\sum_{i=0}^m K(t)_i} \right\} \right\}$$

де  $m$  – загальна кількість просторових комірок, на які розбита площа дослідження. У формулі використовують параметри  $r(t)$  і  $K(t)$ . У загальному випадку будемо вважати, що вони не тільки просторово розподілені, але є функціями від часу, таким чином ми маємо можливість закладати зміну цих параметрів внаслідок зміни параметрів середовища або факторів стороннього впливу на популяцію. Наприклад, у параметрі  $K$  передбачено врахування факторів стороннього впливу (зміна ситуації з кормовою базою, боротьба з браконьєрством) при розрахунках коефіцієнту смертності в популяції. Цей коефіцієнт прогнозованої смертності буде коливатися залежно від рівня охорони тої чи іншої території і змінюватися з року в рік, якщо буде вибраний сценарій посиленої охорони.

Загальна формула для розрахунку окремого осередку ґрида виглядає так:

$$N(t+1)_i = N(t)_i * \left\{ 1 + r(t)_i * \left\{ 1 - \frac{N(t)_i}{K(t)_i} \right\} \right\}$$

Розглянемо параметри моделі, коефіцієнти приросту і показники смертності. Стартова чисельність ( $N(t_0)$ ). За вихідну була взята чисельність популяції у 2019 році (115 особин). Максимальну ємність угідь ( $K$ ) обчислювали як загальну кількість кабанів з урахуванням максимальної щільності популяції (0,03 ос/га), зафіксованої у різні роки за період 2019–2023 рр.

**Розрахунок коефіцієнта приросту  $R$ .** Проведемо розрахунок, виходячи з розподілу самок на території. Якщо взяти за основу фактори, що середній вік кабана дикого у природі – 12 років, здатність самок досягати статевої зрілості на 2 році життя, середня кількість поросят

у виводку (без врахування показника смертності) рівна 6, а репродуктивний вік самок від 2 до 10 років, за умови рівномірного розподілу за віковими групами, тоді показник кількості репродуктивних самок із числа дорослих особин буде рівний 75,0 %. З урахуванням відсотку репродуктивних самок для загального ґрідку отримаємо коефіцієнт приросту  $r(t)_i = 0,75 * 3 = 2,25$ . У випадку застосування цього коефіцієнта до загального ґрідку (а саме – географічно розподіленої інфраструктури ДП, яка об'єднує множини різних лісгоспів, доступ до яких відкритий, незалежно від місця їх розміщення) варто зробити поправку на частку самок від загальної чисельності. Розподіл коефіцієнта приросту в межах певної території буде залежати від цього показника (кількості самок у популяції) і формула для  $r(t)_i$  набуде вигляду:  $r(t)_i = \left[ \left( \frac{Nf(t)_i}{N(t)_i} * 1,01 \right) - D(t)_i \right]$ , де  $Nf(t)$  – розподіл самок,  $N(t)$  – загальний розподіл кабанів,  $D(t)$  – розподіл смертності у популяції.

Розглядають звичайну смертність і смертність, спричинену людиною. Звичайну смертність серед дорослих особин можна розрахувати через середній вік в дикій природі – 12 років, період початку дорослого життя – 2 роки, розподіл за віком вважаємо рівномірним, тому показник смертності –  $1/10=0,1$ . Розрахуємо цей показник для поросят. Якщо вважати, що у виводку виживає лише половина малят, а термін існування виводку – 2 роки, то можна вивести показник їх смертності за рік.

Якщо взяти розмір популяції  $N$ , а шуканий коефіцієнт  $x$ , то формула для розрахунку коефіцієнта буде наступною:  $(N - Nx) - (N - Nx)x = (N - Nk)$ , де  $k$  – коефіцієнт виживання виводка за 2 роки (у нашому випадку 0,5). Перетворюючи формулу, приходимо до квадратного рівняння  $x^2 - 2x + k = 0$ . Корені цього рівняння  $x_{1,2} = \frac{2 \pm \sqrt{4-4k}}{2} = 1 \pm \sqrt{1 - 0,5}$ . Отримуємо два корені  $x_1 = 0,293$ ,  $x_2 = 1,707$ . Оскільки другий корінь дає від'ємне значення чисельності (що в наших умовах не може бути), то використовуємо перше значення кореня. Отже, показник смертності за рік рівний 0,29. Таким чином, загальний показник звичайної смертності з урахуванням просторового розподілу різних вікових груп набуває вигляду:

$$Dc(t)_i = \left( \frac{Nc(t)_i}{N(t)_i} * 0,29 \right) + \left( \frac{N(t)_i - Nc(t)_i}{N(t)_i} * 0,1 \right),$$

де  $Nc(t)$  – розподіл поросят,  $N(t)$  – загальний розподіл кабанів популяції,  $Np(t) = N(t) - Nc(t)$  – розподіл дорослих кабанів популяції.

Передбачається, що показник смертності, спричиненої людиною, також має просторовий аспект. Очевидно, що на територіях, які охороняються, цей показник найнижчий. Таким чином, показник смертності визначають як:

$$D(t) = De(t) + Dp(t)/N(t),$$

$$D(t)_i = \left( \frac{Nc(t)_i}{N(t)_i} * 0,29 \right) + \left( \frac{N(t)_i - Nc(t)_i}{N(t)_i} * 0,08 \right) + \frac{Dp(t)_i}{N(t)_i}.$$

І загальний вигляд формули розрахунку для моделі набуває вигляду:

$$N(t+1)_i = N(t)_i \left\{ \begin{aligned} &* 1 \\ &+ \left[ \left( \frac{Nf(t)_i}{N(t)_i} * 1,01 \right) - \left[ \left( \frac{Nc(t)_i}{N(t)_i} * 0,29 \right) + \left( \frac{N(t)_i - Nc(t)_i}{N(t)_i} * 0,08 \right) + \frac{Dp(t)_i}{N(t)_i} \right] \right] \\ &* \left\{ 1 - \frac{N(t)_i}{K(t)_i} \right\} \end{aligned} \right\}.$$

Слід врахувати, що коефіцієнт приросту (або смертності) у значній мірі залежить від відношення числа особин (у конкретний відрізок часу) до максимальної щільності угідь. Чим

більше кількість особин наближається до максимальної щільності угідь, тим меншим буде загальний коефіцієнт приросту, а його значення будуть асимптотично наближатися до нуля. Фактично це буде відбуватися за рахунок збільшення природної смертності і смертності, спричиненої людиною, а також в результаті посилення внутрішньовидової конкуренції. Подібне співвідношення обумовлює основну тенденцію розвитку популяції (ріст або вимирання). В основному, за рахунок того, що є виключення, у яких з тих чи інших причин смертність перевищує народжуваність.

Вважається, що вікова структура популяції незмінна на деякому проміжку моніторингу. Значить, збільшення або зменшення популяції приводить до пропорційних змін відповідних вікових груп. У той же час це приводить до того, що просторовий розподіл за віковими групами (зафіксовано в ході обліку 2019 р) буде в цілому зберігатися на тимчасовому проміжку прогнозу. Очевидно, що вікова структура прогнозу має свою динаміку як в якісному, так і в просторовому аспекті, але у нас немає параметрів, які для відображення цього процесу ми могли б закласти в модель. Таким чином, виходить, що вихідний для моделі розподіл вікових груп в популяції визначає можливість розмноження популяції протягом усіх років моніторингу. Просторові зміни вікової структури на сьогодні слабо вивчені (особливо в контексті достовірних статистичних показників, що важливо для моделювання цього процесу). Отже, уточнення роботи моделі може бути пов'язано з розробкою окремого механізму прогнозу за зміною вікової структури популяції як у часі, так і у просторі. З іншого боку, зрозуміло, що в цілому для стабільної популяції вікова структура повинна бути достатньо стійкою і її коливання не повинні бути дуже значними. Вони можуть бути викликані або стохастичними факторами (які навряд будуть сильними), або форс-мажорними, які неможливо закласти в модель. Це ще один постулат для моделі, що розвиток популяції буде проходити без виникнення форс-мажорних ситуацій. Ще одне правило, що модель будувється в межах території їх існування і не передбачає її розширення (хоча скорочення можливе). Це правило також може бути змінено при подальшій роботі над моделлю.

### Результати досліджень та їх обговорення

Для прикладу розглянемо Улашківське лісництво (табл. 1) та на основі поданих даних реалізуємо модель Ферхюльста. За початкову кількість візьмемо матеріали 2019 року (n=8) і подивимося, який результат дасть програма реалізації моделі через 4 роки (рис. 1).

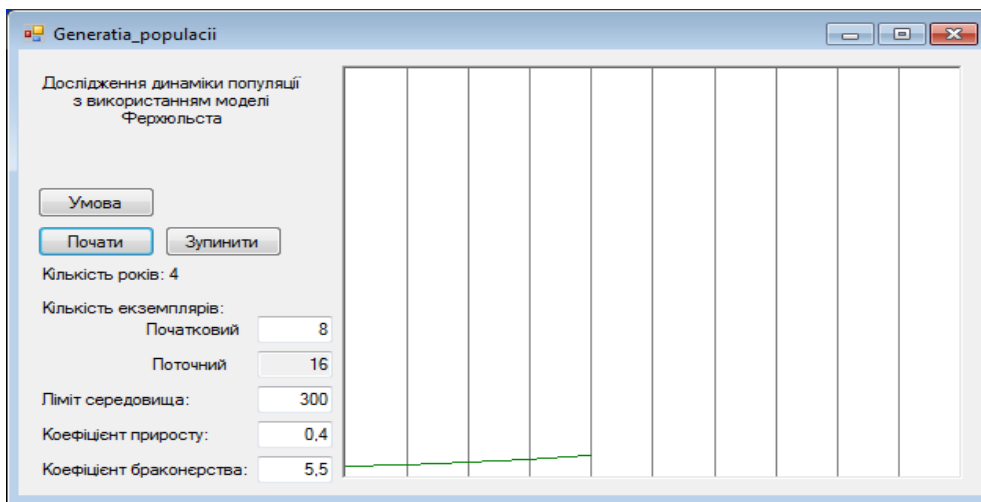


Рис. 1. Оцінка чисельності популяції кабанів з 2019 по 2023 роки за даними обліку і з допомогою моделі для Улашківського лісництва.

Як бачимо, результати моделювання повністю співпадають з даними чисельності популяції за 2023 рік (табл. 1, n = 16).

Для моделювання динаміки чисельності можна задавати різноманітні параметри: процесів, гридів, тривалості аналізу. Наприклад, розглянемо два лісництва – Більче-Золотецьке

і Улашківське. За початкову чисельність візьмемо дані кожного із лісництв за 2019 рік (див. табл. 1).

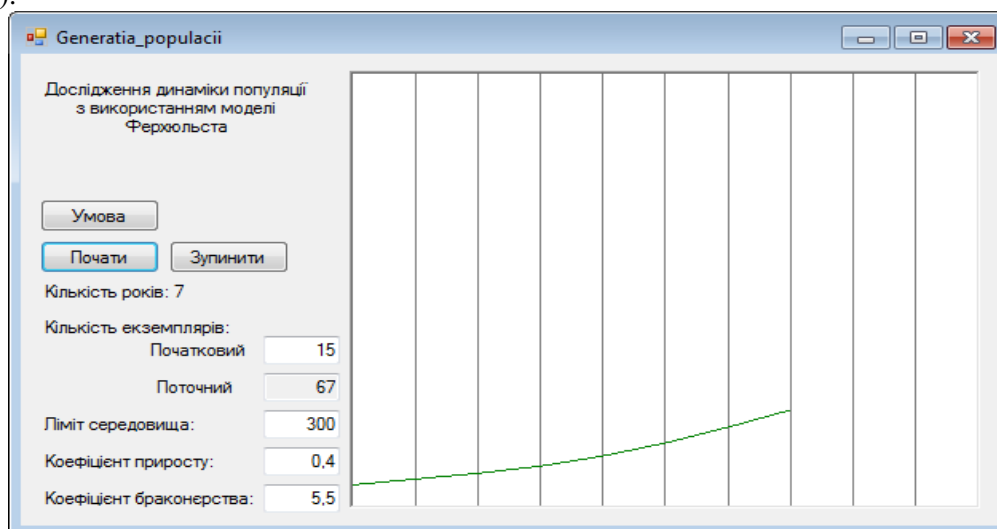


Рис. 2. Оцінка чисельності популяції кабанів з 2019 по 2026 роки за даними обліку і з допомогою моделі для Більче-Золотецького і Улашківського лісництв.

Застосування моделі для розрахунку динаміки чисельності популяції кабанів дало хороші результати за період з 2019 ( $n = 7$  та  $n = 8$ , відповідно) по 2026 роки (рис. 2), що дозволило спрогнозувати зростання чисельності популяції обох лісництв до 67 особин.

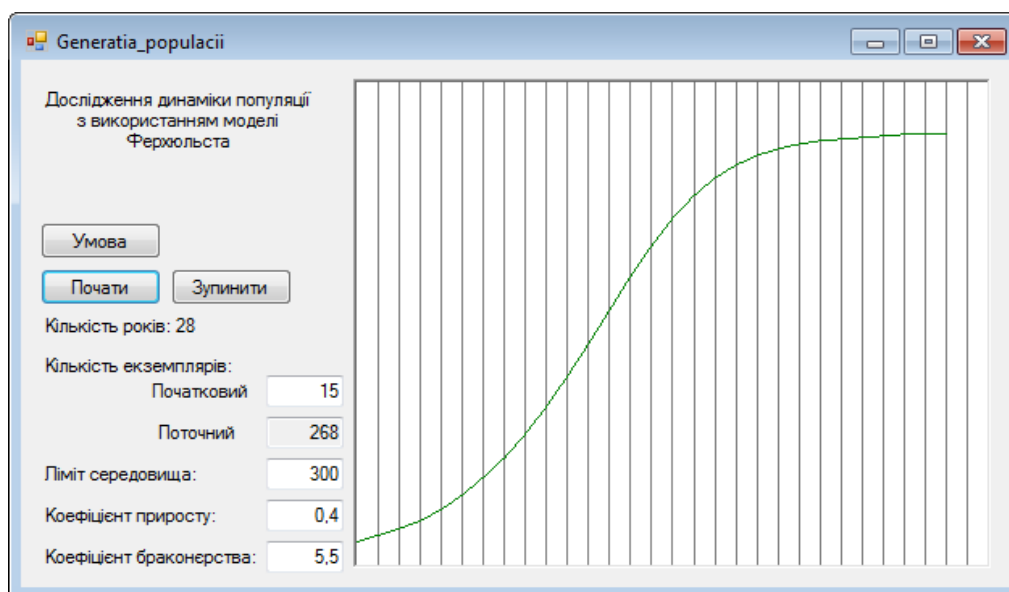


Рис. 3. Оцінка чисельності популяції кабанів із 2019 по 2047 роки з допомогою моделі для Більче-Золотецького і Улашківського лісництв.

Отримані в результаті обчислення значення або відповідали даним спостереження, або відрізнялися від них із незначною похибкою, фіксуючи збільшення чисельності за 10 років приблизно в 5 разів. Картина змінилася для останнього періоду спостережень. Модель дала чергове збільшення чисельності за 14 років і дані дослідження показали тенденцію до стабілізації чисельності популяції. Очевидно, цей факт можна пояснити порушенням середовища існування, спричиненим тривалими суцільними рубками, подолати які можна лише за умови втілення положення про запобігання злочинам і адміністративним правопорушенням у сфері лісового та мисливського господарства [16].

Згідно з моделлю за 2019 рік спостерігаємо ріст чисельності популяції. У 2023 році результати дослідження узгоджуються з останніми даними обліку. З 2025 по 2042 рік чисельність популяції кабана дикого мала би збільшуватися з подальшою стабілізацією до 2047 року (рис. 3).

Для всіх лісництв ДП «Чортківський лісгосп» кількість кабанів в 2019 році складає 115 особин, цю кількість ми можемо закласти в модель як початкову. За результатами роботи програми, через яку реалізуємо модель, бачимо, що стабілізація кількості особин популяції відбудеться через 10–12 років (рис. 4).

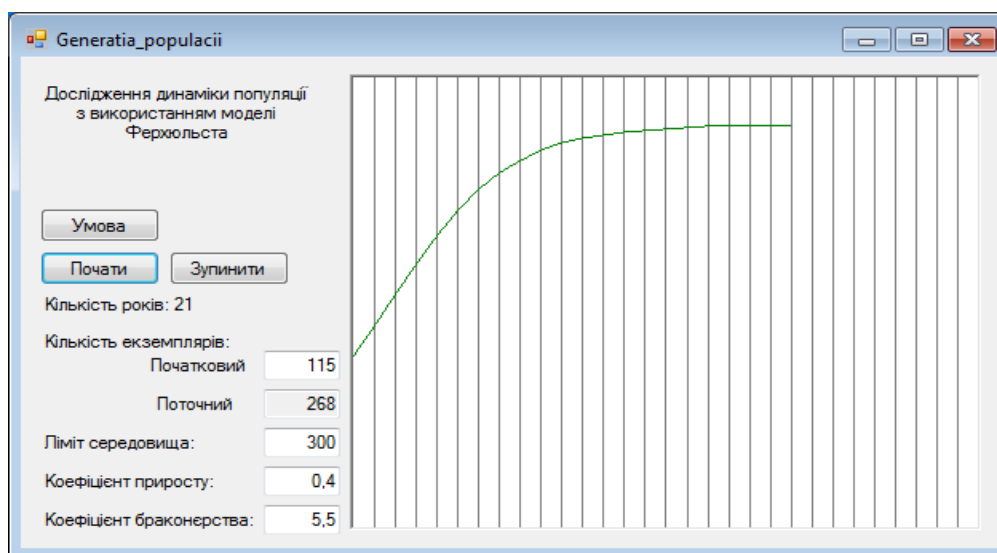


Рис. 4. Оцінка чисельності популяції кабанів з 2019 по 2036 роки з допомогою моделі для всіх лісництв ДП «Чортківський лісгосп».

Описана модель є схематичною, що обумовлено недоступністю або відсутністю більш повної інформації. Власне тому важливо звернути увагу на практичне значення моделі для визначення основних пріоритетів та напрямків моніторингу стану популяцій мисливських тварин. Перш за все потребують уточнення значення коефіцієнтів народжуваності і виживання, але загальна чисельність популяції, розрахована з допомогою моделі, суттєво не зміниться.

У той же час вона не описує динаміку чисельності популяції на інших територіях. Усяка популяція може переживати не тільки фази росту і стабілізації, але і фазу падіння чисельності. Зміни в майбутньому можливі в двох напрямках, причому одночасно: у сторону зменшення – внаслідок зменшення території для існування під дією антропогенного впливу (суцільна рубка лісів), у бік збільшення – внаслідок зростання кормової бази і покращення умов існування.

Ще один потенційний напрямок для покращення моделі – це введення механізму внутрішньо-популяційної міграції кабанів. На сьогодні дуже мало даних щодо кількісної оцінки цього явища і не розроблена сама модель такого механізму.

Ще одне уточнення моделі пов'язане з динамікою просторового розподілу статевікової структури популяції. Було б цікаво реалізувати в моделі такий механізм і оцінити його числові параметри, а також вплив на розрахунки в цілому.

## Висновки

На основі вивчення та аналізу наукових робіт в галузі математичної біології виділено важливий підхід до опису популяцій, а саме – популяційний, – що дозволяє чітко відокремити докільця від досліджуваного об'єкта. У рамках цього підходу проведено аналіз моделей популяційної динаміки, у результаті якого був виділений клас дискретних матричних моделей (зокрема модель Ферхюльста), яка дозволяє аналізувати загальну чисельність популяції.

Зроблено прогноз зростання загальної чисельності популяції з перебігом часу. Показано, що результати, отримані за допомогою моделі Ферхюльста, достатньо добре узгоджені з

реальними даними, як для окремих лісництв, так і для ДП «Чортківське лісове господарство», загалом.

У свою чергу отримані результати моделювання є теоретичною і методичною основою як для визначення основних пріоритетів та напрямків моніторингу популяційної динаміки, так і прогнозування розвитку популяції у певних часових рамках, за допомогою чого можна здійснювати прогнозування чисельності популяцій не тільки мисливських тварин, а й усього тваринного населення України, що актуально в умовах російської агресії і, особливо, у період повоєнного відновлення довкілля.

1. Бондаренко В. Д., Різун Е. М. Актуальні питання стану і ведення мисливського господарства в Україні та можливі напрями їх вирішення: збірник наукових праць: *Наукові праці Лісівничої академії наук України*. Львів : РВВ НЛТУ України. 2016. Вип. 14. С. 180–184.
2. Ведення мисливського господарства у 2015 році. Державний комітет статистики України. Статистичний бюлетень. Київ, 2016. 17 с. URL: <https://www.calameo.com/read/007204981515bf976f35f> (дата звернення: 20.05.2023).
3. Виноградський О. Сучасні стратегії лісівництва. *Лісовий і мисливський журнал*. URL: <https://ekoinform.com.ua/?p=15960> (дата звернення: 20.05.2023).
4. Волох А. М. Великі ссавці південної України в ХХ ст. (динаміка ареалів, чисельності, охорона та управління) : автореф... докт. біол. наук. 03.00.08. Київ, 2004. 32 с.
5. Всеукраїнська екологічна ліга. Аналіз проекту розпорядження кабінету міністрів України «Про схвалення концепції розвитку мисливського господарства в Україні на період 2021–2025 роки» URL: <https://www.ecoleague.net/pres-tsentr-vel/novyny/2020-rik/hruden/item/2056-analiz-proiektu-rozporiadzhennia-kabinetu-ministriv-ukrainy-pro-skhvalennia-kontseptsii-rozvytku-myslyvskoho-hospodarstva-v-ukraini-na-period-2021-2025-roky> (дата звернення: 21.05.2023).
6. Голубець М. А. Геосоціосистемологія – теоретична основа еколого суспільно економічного прогресу. *Вісн. НАН України*. 2014. № 6. С. 31–40.
7. Грод І. М., Загороднюк І. В., Шевчик Л. О., Кравець Н. Я. Моделювання чисельності гризунів у лісових біотопах Західного Поділля (на прикладі *Myodes glareolus*). *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Сер. Біологія*. 2021. Вип. 1–2 (81). С. 19–30.
8. Грод І. М., Кравець Н. Я., Шевчик Л. О. Прогнозування зміни чисельності комах-запилювачів в залежності від кількості груп рослин виділеної території. *Фізико-математична освіта*. 2018. 3. С. 37–44.
9. Домніч В. І. Роль копитних (Cervidae, Bovidae) та хижих (Canidae) у біогеоценозах окремих районів Палеарктики : автореф... докт. біол. наук. 03.00.07 Дніпропетровськ, 2008. 42 с.
10. Жук Ю. О. Системні особливості освітнього середовища як об'єкта інформатизації. *Післядипломна освіта в Україні*. 2003. № 2. С. 35–38.
11. Загороднюк І., Дикий І. Мисливська теріофауна України: видовий склад і вернакулярні назви. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*. 2012. Вип. 58. С. 21–44.
12. Литвинова С. Г. Використання систем комп'ютерного моделювання для проектування дослідницьких завдань. *Фізико-математична освіта*. 2018. Вип. 1 (15). С. 83–89.
13. Маценко В. Г. Математичне моделювання: навчальний посібник. Чернівці : Чернівецький національний університет, 2014. 519 с.
14. Межжерин С. В. Животные ресурсы Украины в свете стратегии устойчивого развития Аналитический справочник. Киев: Логос, 2008. 282 с.
15. Про затвердження Методики визначення шкоди та збитків, заподіяних лісовому фонду внаслідок збройної агресії Російської Федерації : Наказ Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України № 414 від 05.10.2022 URL: <https://ips.ligazakon.net/document/MN026061> (дата звернення: 21.05.2023).
16. Про затвердження Положення про державну лісову охорону, лісову охорону інших лісокористувачів та власників лісів : Постанова Кабінету міністрів України N 976 від 16.09.2009 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/976-2009-%D0%BF#Text> (дата звернення: 21.05.2023).
17. Про мисливське господарство та полювання : Закон України від 22.02.2000 № 1478-III. *Відомості Верховної Ради України*. 2000. №18. Ст.132. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1478-14#Text> (дата звернення: 20.05.2023).
18. Різун Е., Бондаренко В. Динамічні тенденції стану популяцій мисливської теріофауни України та пропозиції щодо вдосконалення облікових робіт. *Праці Теріологічної Школи*. 2016. № 14. С. 34–40.

19. Синякевич І. М. Екологічна політика. Стратегія подолання глобальних екологічних загроз : монографія. Львів : ЗУКЦ Нац. Лісо-техн. Ун-т України, 2011. 331 с.
20. Терно С. О. Проблемні задачі з історії для старшокласників: дидактичний посібник для учнів 10–11 класів загальноосвіт. нав. закл. Запоріжжя : Просвіта, 2006. 32 с.
21. Balyk N., Grod I., Vasylenko Y., Oleksiuk V., Rogovchenko Y. Project-based learning in a computer modelling course. *Journal of Physics: Conf. Ser.* 2021. Vol. 1840 e012032. URL: <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1840/1/012032> (Last accessed: 20.05.2023).

## References

1. Bondarenko V. D., Rizun E. M. Aktualni pytannia stanu i vedennia myslyvskoho hospodarstva v Ukraini ta mozhyvi napriamy ikh vyrishennia: zbirnyk naukovykh prats: *Naukovi pratsi Lisivnychoi akademii nauk Ukrainy*. Lviv : RVV NLTU Ukrainy. 2016. №. 14. S. 180–184. [in Ukrainian]
2. Vedennia myslyvskoho hospodarstva u 2015 rotsi. Derzhavnyi komitet statystyky Ukrainy. Statystychnyi biuleten. Kyiv, 2016. 17 s. URL: <https://www.calameo.com/read/007204981515bf976f35f> (data zvernennia: 20.05.2023). [in Ukrainian]
3. Vynohradskyi O. Suchasni stratehii lisivnytstva. Lisovy i myslyvskyi zhurnal. URL: <https://ekoinform.com.ua/?p=15960> (data zvernennia: 20.05.2023). [in Ukrainian]
4. Volokh A. M. Velyki ssavtsi pivdennoi Ukrainy v XX st. (dynamika arealiv, chyselnosti, okhrona ta upravlinnia): avtoref... dokt. biol. nauk. 03.00.08. Kyiv, 2004. 32 s. [in Ukrainian]
5. Vseukrainska ekolohichna liha. Analiz proiektu rozporiadzhennia kabinetu ministriv Ukrainy «Pro skhvalennia kontseptsii rozvytku myslyvskoho hospodarstva v Ukraini na period 2021–2025 roky» URL: <https://www.ecoleague.net/pres-tsentr-vel/novyny/2020-rik/hruden/item/2056-analiz-proiektu-rozporiadzhennia-kabinetu-ministriv-ukrainy-pro-skhvalennia-kontseptsii-rozvytku-myslyvskoho-hospodarstva-v-ukraini-na-period-2021-2025-roky> (data zvernennia: 21.05.2023). [in Ukrainian]
6. Holubets M. A. Heosotsiosystemolohiia – teoretychna osnova ekolooho suspilno ekonomichnoho prohresu. *Visn. NAN Ukrainy*. 2014. No 6. S. 31–40. [in Ukrainian]
7. Hrod I. M., Zahorodniuk I. V., Shevchuk L. O., Kravets N. Ya. Modeliuvannia chyselnosti hryzuniv u lisovykh biotopakh Zakhidnoho Podillia (na prykladi *Myodes glareolus*). *Naukovi zapysky Ternopil'skoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Ser. Biolohiia*. 2021. Vyp. 1–2 (81). S. 19–30. [in Ukrainian]
8. Hrod I. M., Kravets N. Ya., Shevchuk L. O. Prohnozuvannia zminy chyselnosti komakh-zapyliuvachiv v zalezhnosti vid kilkosti hrup roslyn vydilenoj terytorii. *Fizyko-matematychna osvita*. 2018. 3. C. 37–44. [in Ukrainian]
9. Domnich V. I. Rol kopytnykh (Cervidae, Bovidae) ta khyzhykh (Canidae) u bioheotsenozakh okremykh rayoniv Palearktyky: avtoref... dokt. biol. nauk: 03.00.07. Dnipropetrovsk, 2008. 42 s. [in Ukrainian]
10. Zhuk Yu. O. Systemni osoblyvosti osvitnoho seredovyscha iak obiekta informatyzatsii. *Pisliadyplomna osvita v Ukraini*. 2003. No 2. S. 35–38. [in Ukrainian]
11. Zahorodniuk I., Dykyi I. Myslyvska teriofauna Ukrainy: vydovy sklad i vernakuliarni nazvy. *Visnyk Lvivskoho universytetu. Serii biologichna*. 2012. Vyp. 58. S. 21–44. [in Ukrainian]
12. Lytvynova S. H. Vykorystannia system kompiuternoho modeliuvannia dlia proektuvannia doslidnytskykh zavdan. *Fizyko-matematychna osvita*. 2018. Vyp. 1 (15). S. 83–89. [in Ukrainian]
13. Matsenko V. H. Matematychno modeliuvannia: navchalnyi posibnyk. Chernivtsi : Chernivetskyi natsionalnyi universytet, 2014. 519 s. [in Ukrainian]
14. Mezhhzherin S. V. Zhivotnye resursy Ukrainy v svete strategii ustoychivogo razvitiia Analiticheskii spravochnik. Kyiv : Logos, 2008. 282 s. [in Russian]
15. Pro zatverdzhennia Polozhennia pro derzhavnu lisovu okhronu, lisovu okhronu inshykh lisokorystuvachiv ta vlasnykiv lisiv : Postanova Kabinetu ministriv Ukrainy N976 vid 16.09. 2009 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/976-2009-%D0%BF#Text> (data zvernennia: 21.05.2023). [in Ukrainian]
16. Pro zatverdzhennia Polozhennia pro derzhavnu lisovu okhronu, lisovu okhronu inshykh lisokorystuvachiv ta vlasnykiv lisiv : Postanova Kabinetu ministriv Ukrainy N 976 vid 16.09.2009 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/976-2009-%D0%BF#Text> (data zvernennia: 21.05.2023). [in Ukrainian]
17. Pro myslyvske hospodarstvo ta poliuvannia : Zakon Ukrainy vid 22.02.2000 No 1478-III. Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy. 2000. No18. St.132. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1478-14#Tex> (data zvernennia: 20.05.2023). [in Ukrainian]

18. Rizun E., Bondarenko V. Dynamichni tendentsii stanu populiatsii myslyvskoi teriofauny Ukrainy ta propozytsii shchodo vdoskonalennia oblikovykh robot. *Pratsi Teriologichnoi Shkoly*. 2016. No 14. S. 34–40. [in Ukrainian]
19. Syniakevych I. M. Ekologichna polityka. Stratehiia podolannia hlobalnykh ekologichnykh zahroz: monohrafiia. Lviv : ZUKTs Nats. liso-tekh. un-t Ukrainy, 2011. 331 s. [in Ukrainian]
20. Terno S. O. Problemni zadachi z istorii dlia starshoklasnykiv: dydaktychnyi posibnyk dlia uchniv 10-11 klasiv zahalnoosvit. nav. zakl. Zaporizhzhia : Prosvita, 2006. 32 s. [in Ukrainian]
21. Balyk N., Grod I., Vasylenko Y., Oleksiuk V., Rogovchenko Y. Project-based learning in a computer modelling course. *Journal of Physics: Conf. Ser.* 2021. Vol. 1840 e012032. URL: <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1840/1/012032> (Last accessed: 20.05.2023).

<sup>1</sup>I. M. Grod, <sup>1</sup>L. O. Shevchuk, <sup>1</sup>H. M. Holinei, <sup>2</sup>N. Ya. Kravets, <sup>1</sup>O. L. Glavatska

<sup>1</sup>Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ukraine

<sup>2</sup>I. Horbachevsky Ternopil National Medical University, Ukraine

#### ANALYSIS OF THE POPULATION DYNAMICS OF THE WILD BOAR (*SUS SCROFA*, LINNAEUS, 1758) USING THE VERHULST MODEL

The article discusses the utilization of computer modeling as a key avenue for integrating modern information technologies into the modernization of environmental impact assessment (EIA). This process aims to identify the nature, intensity, and degree of the environmental and public health effects resulting from various economic activities.

To facilitate a comprehensive examination of biodiversity, the potential for interdisciplinary integration is explored. The article also delves into the practice of employing software environments for modeling biological issues using mathematical models and investigates the incorporation of these mathematical model algorithms into computer modeling processes. The effectiveness of a range of research tasks in biology is demonstrated, forming the foundation for interdisciplinary integration between the fields of nature, mathematics, and informatics.

Verhulst's mathematical model is employed to create a computer model for reproducing ecological processes, implemented using the Python programming environment. The article justifies the proposed methodology's validity through a practical, integrated approach, emphasizing the practical application of computer modeling using mathematical models to study biological processes.

*Key words: computer modeling, mathematical model, hunting animals, environmental impact assessment, biological processes, population.*

Надійшла 30.05.2023.