
ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОЛОГІЧНОГО ТА ЛАНДШАФТНОГО РІЗНОМАНІТТЯ

УДК 592:574

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.1-58.14>

СТРУКТУРА КОМПЛЕКСІВ ДОЩОВИХ ЧЕРВІВ В УРБОЕКОСИСТЕМІ: МОДЕЛЮВАННЯ БІОРІЗНОМАНІТТЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Гарбар О.В., Мороз В.В.

Житомирський державний університет імені Івана Франка
вул. Велика Бердичівська, 40, 10008, м. Житомир
o.v.harbar@gmail.com, vikamoroz14@ukr.net

У результаті дослідження фауни дощових черв'яків в урбанізованому середовищі міста Житомира (Україна) встановлено, що вона представлена десятьма видами, що належать до шести родів родини Lumbricidae: *A. caliginosa*, *A. rosea*, *A. trapezoides*, *L. terrestris*, *L. castaneus*, *L. rubellus*, *O. lacteum*, *D. octaedra*, *E. fetida* та *E. tetraedra*. Число особин у вибірці варіювало в широких межах (від 1 до 29 екз.) при середньому значенні – 5,82 екз., що свідчить про достатньо низьку чисельність досліджуваних тварин у більшості випадків. Видова різноманітність дощових черв'яків у більшості аналізованих проб також низька (максимальне число видів – 6, середнє значення – 2,15). Значення використаних індексів біорізноманіття свідчать, що на досліджуваній території структура комплексів дощових черв'яків варіює від вирівняної з майже не вираженими домінантами до комплексів з чітко вираженими домінантами (моновидових включно). З метою прогнозування просторового розподілу показників біорізноманіття використано регресійну модель, що базується на методі машинного навчання Random Forest. У якості змінних в регресійній моделі використано растеризовані точкові оцінки біорізноманіття, смуги висоти над рівнем моря та ухилу, обчислені з Copernicus GLO30 DEM, радарні дані Sentinel-1 (смуги знімання VV та VH), а також спектральні дані Sentinel-2 (спектральні смуги B1-B8, B8A, B9, B11, B12) та спектральні індекси, розраховані на їх основі. Це дозволило отримати ефективну та надійну регресійну модель просторового розподілу показників біорізноманіття ($R^2 > 0,92$, RMSE % = 11,83 – 27,69), яка здатна пояснити понад 90% варіації залежної змінної. Прогноз, отриманий на основі моделі свідчить, що осередками біорізноманіття в урбоєкосистемі міста Житомира є зелені зони та долини річок, які менше піддаються антропогенному навантаженню і характеризуються сприятливішими для дощових черв'яків едафічними умовами. Отримані результати можуть бути використані при проведенні подальших локальних досліджень фауни дощових черв'яків в урбоєкосистемах України. Запропонована методологія моделювання показників біорізноманіття на основі методу машинного навчання Random Forest може застосовуватись для моделювання показників біорізноманіття не лише дощових черв'яків, але й широкого спектру інших груп біонтів як в урбанізованому середовищі, так і в природних біотопах. **Ключові слова:** Lumbricidae, фауна, біорізноманіття, просторовий розподіл, моделювання.

Structure of earthworm complexes in the urban ecosystem: modeling biodiversity using machine learning. Harbar O., Moroz V.

A study of the earthworm fauna in the urban environment of Zhytomyr (Ukraine) revealed the presence of ten species belonging to six genera of the Lumbricidae family: *A. caliginosa*, *A. rosea*, *A. trapezoides*, *L. terrestris*, *L. castaneus*, *L. rubellus*, *O. lacteum*, *D. octaedra*, *E. fetida*, and *E. tetraedra*. Number of individuals in the samples varied from 1 to 29 individuals, with an average of 5.82, indicating a relatively low abundance of the studied animals in most cases. Species diversity of earthworms was also low (maximum number of species – 6, average – 2.15). Analysis of biodiversity indices showed that the structure of earthworm complexes ranged from uniform, without pronounced dominants, to complexes with clearly expressed dominants (including monodominant ones). To predict the spatial distribution of biodiversity indicators, a regression model based on the Random Forest machine learning method was used. The rasterized point estimates of biodiversity, elevation and slope bands calculated from Copernicus GLO30 DEM, Sentinel-1 radar data (VV and VH bands), as well as Sentinel-2 spectral data (spectral bands B1-B8, B8A, B9, B11, B12) and spectral indices calculated on their basis were used as variables in the regression model. This made it possible to obtain an effective and reliable regression model of the spatial distribution of biodiversity indicators ($R^2 > 0.92$, RMSE % = 11.83 – 27.69), which is able to explain more than 90% of the variation in the dependent variable. The forecast obtained from the model indicates that the centers of biodiversity in the urban ecosystem of Zhytomyr are green zones and river valleys, which are less subject to anthropogenic pressure and are characterized by more favorable edaphic conditions for earthworms. The results obtained can be used for further local studies of earthworm fauna in urban communities of Ukraine. The proposed methodology for modeling biodiversity indicators based on the Random Forest method can be applied to model biodiversity indicators not only for earthworms but also for a wide range of other biotic groups in both urban and natural environments. **Key words:** Lumbricidae, fauna, biodiversity, spatial distribution, modeling.

Постановка проблеми. Впродовж останніх десятиріч рівень урбанізації з кожним роком зростає, а діяльність людського суспільства в антропо-

цені стала глобальною рушійною силою трансформації екосистем [1; 2]. Урбанізація призводить до розширення міських урбоєкосистем, які за масш-

табами екологічних проблем займають особливе місце та є складними багатофункціональними природно-антропогенними системами з трансформованими ландшафтами, що концентрують максимальну різноманітність видів антропогенного впливу на едафотоп [2; 3; 4; 5]. Антропогенний вплив призводить до змін фізико-хімічних властивостей ґрунту [6] та впливає на розподіл видів і середовищ існування через ряд факторів і процесів, включаючи землекористування та зміну ґрунтового покриву, забруднення, надмірну експлуатацію ресурсів [7] та біологічні вторгнення [8].

Актуальність дослідження. Збереження екосистем та біорізноманіття є глобальним викликом ХХІ ст., що забезпечує природну стабільність біосфери на фоні збільшення рівня техногенного забруднення та погіршення стану навколишнього середовища [9; 10]. Проблеми, пов'язані з антропогенним впливом на довкілля, все більше визнаються на національному та міжнародному рівнях.

Ґрунт виконує багато екосистемних функцій, які є важливими для біосфери [2]. Міські ґрунти внаслідок урбанізації зазнають систематичних порушень (ущільнення, деградація, зміна покриву), що спричиняє безповоротні зміни структури природних популяцій рослин та тварин. У містах існує ряд ґрунтових умов – від відносно непорушених (як правило, на ділянках залишків рослинності та старих парках) до повністю технічних ґрунтів. Такі різноманітні умови формують мозаїку ґрунтових середовищ існування для підземної біоти [11; 12; 13]. Наявність актуальної інформації про стан ґрунтового покриву у просторі та часі є центральною для багатьох програм геомоніторингу.

Одними з найпоширеніших та важливих компонентів міської ґрунтової фауни є дощові черви, які розглядаються як корисні безхребетні організми, що покращують стан ґрунту. Унаслідок відносно високої чисельності у поверхневих ґрунтових шарах та чутливості до рівня забруднення середовища люмбрици часто використовуються як біоіндикатори оцінки стану едафотопу [14].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Вивчення видових комплексів дощових червів у біотопах міських урбоекосистем забезпечує виявлення осередків високого біорізноманіття, а також дозволяє здійснювати оцінку екологічного стану едафотопів на локальному рівні. Умовою забезпечення довгострокової стійкості елементів, що складають біорізноманіття, є збір та накопичення базової інформації (розподіл видів, їх біологія, умови середовища існування), необхідної для ефективного управління ними. Використання функціональних можливостей геоінформаційних систем є важливим для опису біорізноманіття, його просторово-часових змін, накопичення в базах даних інформації про екосистеми, моделювання та прогнозування їх динаміки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивченню фауни дощових червів різних міських едафотопів присвячено багато праць, зокрема, дослідження біорізноманіття люмбрицид проведено у парках [15; 16], міських ботанічних садах [17; 18], житлових дворах [5; 19], промислових зонах [5]. Унаслідок трансформації природних середовищ існування, у тому числі ґрунтового, види, які живуть у цих середовищах, неминуче знаходяться під загрозою [9]. Під час урбанізації зазвичай відбувається повна заміна природної відкритої землі будівлями або іншими непроникними спорудами, що змінює динаміку поширення видів у просторі. Зміни у ґрунтовому покриві та землекористуванні по-різному впливають на біорізноманіття [20].

Дистанційне зондування має значний потенціал як джерело інформації про біорізноманіття у ландшафтному, регіональному, континентальному та глобальному просторовому масштабі [12; 21]. Супутникові методи дистанційного зондування є цінним альтернативним джерелом інформації про характеристики екосистем у просторово-часових масштабах. Зображення дистанційного зондування та шари географічної інформаційної системи використовуються як предиктори в аналізі рослинності та моделюванні. Продукти дистанційного зондування здатні надавати безперервну просторово-часову інформацію про ключові фактори, що сприяють розподілу [22; 23].

Геоінформаційне моделювання є процесом створення моделей місцевості певних територій у середовищі геоінформаційних систем. Створені моделі візуалізують якісні та кількісні параметри моделюваної місцевості, відображають інтенсивність протікання природних процесів, дають об'єктивну оцінку стану об'єкта (міського середовища, окремих компонентів середовища, антропогенної діяльності) [24]. Геоінформаційне моделювання використовують для оцінки екологічних параметрів, які визначають просторовий розподіл рослин і тварин за допомогою створених шарів карти та баз даних, поясненні закономірностей поширення видів флори та фауни у природі та оцінюванні впливу змін умов середовища на їх розподіл [25]. Рядом авторів проведено численні дослідження щодо оцінки просторового та часового розподілу видів рослин за допомогою геоінформаційних систем [26-31].

У дослідженні тварин інструменти геоінформаційних систем використовувалися з метою встановлення меж екологічної толерантності на основі моделювання екологічної ніші [32], картографування придатних для землекористування територій [33], розгляду моделей передачі хвороб і просторової структури популяцій тварин [34], встановлення пріоритетів збереження видів та аналізу просторового зв'язку між місцевими породами [35], вивчення ступеню екологічної стійкості видів птахів-предків для оцінки успішності одомашнення [36].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Метою дослідження є вивчення фауни дощових черв'їв (*Lumbricidae*) в урбанізованому середовищі міста Житомира. Відповідно до цієї мети сформульовано такі завдання: 1) встановити видовий склад та основні показники біорізноманіття комплексів дощових черв'їв; 2) розробити методологію використання регресійної моделі Random forest для моделювання просторового розподілу показників біорізноманіття на основі даних дистанційного зондування Землі; 3) оцінити можливість використання розробленого методологічного підходу для прогнозування просторового розподілу показників біорізноманіття комплексів дощових черв'їв в урбо-екосистемі міста Житомира.

Новизна. Вперше проведено дослідження видової різноманітності та структури комплексів дощових черв'їв в умовах урбоекосистеми міста Житомира. На основі зібраних даних та даних дистанційного зондування (космічні знімки Sentinel-1, Sentinel-2 та цифрова модель рельєфу Copernicus GLO30 DEM) вперше проведено моделювання просторового розподілу досліджуваних показників біорізноманіття з використанням методів машинного навчання (регресійна модель Random forest).

Методологічне або загальнонаукове значення.

Перед зростаючими викликами, спричинених антропогенною діяльністю та урбанізацією, ефективне планування і прийняття рішень щодо збереження біорізноманіття та екосистем є вкрай важливими завданнями сучасності. Геопросторове представлення статусу середовища існування стало ключовим питанням для планування збереження видів. Характеристики середовищ існування педобіонтів є основою для визначення пріоритетів у напрямку збереження біорізноманіття, у тому числі і дощових черв'їв. Запропонована методологія дозволяє ефективно прогнозувати просторовий розподіл значень показників біорізноманіття для великих територій, та оцінювати їх дистанційно на основі обмеженого обсягу даних польових досліджень.

Матеріали та методи досліджень. Матеріалом для дослідження, проведеного протягом березня–серпня 2024 року, послуговували 1921 екз. дощових черв'їв родини *Lumbricidae* із 330 вибірок (рис. 1). Збір матеріалу здійснювали в польових умовах методом ручного розкопування та пошарового розбирання ґрунтових проб об'ємом 0,125 м³. Територією дослідження обрано антропогенно-трансформовані біотопи м. Житомира – рекреаційні території, біоценози поблизу автодорі, житлових забудов і діючих

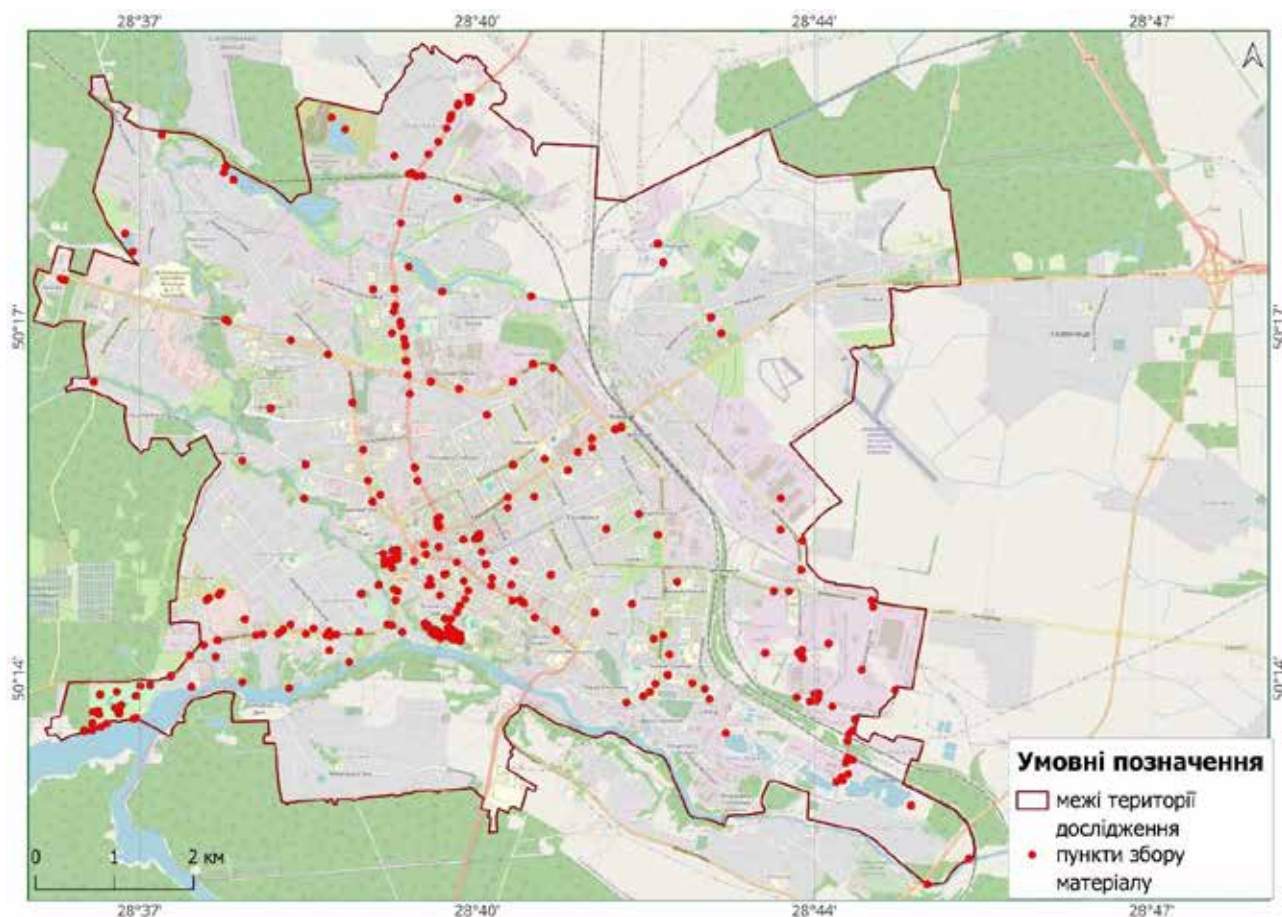


Рис. 1. Пункти збору матеріалу на території міста Житомира

промислових підприємств. Вибір проб здійснювали до нижньої межі, де траплялися черви.

Перед початком визначення, відібраних червів фіксували у 70% етиловому спирті, попередньо змивши під проточною водою слиз і частинки ґрунту з покривів тварин. Для встановлення видової приналежності червів користувалися наявними рекомендаціями [17]. Дослідження проводилося на базі кафедри екології та географії Житомирського державного університету імені Івана Франка.

Для моделювання просторового розподілу показників біорізноманіття використано регресійну модель, що базується на методі машинного навчання Random forest [37], реалізованому на базі хмарного сервісу Google Earth Engine [38].

У якості еталонних даних та одного із предикторів в регресійній моделі використано точкові оцінки найбільш уживаних індексів біорізноманіття для видових комплексів дощових червів в урбоскопії міста Житомира (число видів, число особин, індекс домінування, індекс Шенона, індекс Брілуїна, індекс Менхінка, індекс Маргалефа). На основі точкових даних на першому етапі було створено растри, які містили значення відповідних показників біорізноманіття у пікселях, що співпадали з пунктами збору матеріалу (рис. 2). Для усіх інших пікселів растру було задано «відсутні» значення, оскільки для них не були встановлені оцінки досліджуваних показників. Аналіз проведено на основі модифікованого коду Java Script для Google Earth Engine [39].

У якості змінних в регресійній моделі окрім rasterизованих точкових оцінок біорізноманіття використано смуги висоти над рівнем моря та ухилу, обчислені з Copernicus GLO30 DEM, радарні дані

Sentinel-1 (смуги знімання VV та VH), а також спектральні дані Sentinel-2 (спектральні смуги B1-B8, B8A, B9, B11, B12) та спектральні індекси, розраховані на їх основі [39]:

нормалізований диференційний вегетаційний індекс:

$$NDVI = (B8 - B4) / (B8 + B4);$$

модифікований нормалізований диференційний водний індекс:

$$MNDWI = (B3 - B11) / (B3 + B11);$$

нормалізований диференційний індекс забудови:

$$NDBI = (B11 - B8) / (B11 + B8);$$

вдосконалений вегетаційний індекс:

$$EVI = 2.5 * ((B8 - B4) / (B8 + 6 * B4 - 7.5 * B2 + 1));$$

індекс відкритого ґрунту:

$$BSI = ((B11 + B4) - (B8 + B2)) / ((B11 + B4) + (B8 + B2)).$$

Для маскуванню захмарених ділянок космічних знімків Sentinel-2 використано набір даних Google CloudScore. Після завершення підготовки даних всі отримані зображення експортовано у папку ресурсів проекту в Google Earth Engine. Це гарантує можливість обробки великого набору даних, не стикаючись із обмеженнями цього хмарного сервісу.

На другому етапі будували регресійну модель для передбачення значень показників біорізноманіття для територій, де дані відсутні. При цьому смуги та індекси Sentinel-2, смуги Sentinel-1, смуги висоти та ухилу (всього 21 параметр) використовували в якості залежних змінних (предикторів), а rasterизовані точкові оцінки показників біорізноманіття як неза-



Рис. 2. Фрагмент rasterизованих точкових даних (індекс домінування)

лежну змінну (прогнозовану) у регресійній моделі. Після тренування моделі обчислювали середньоквадратичну похибку (RMSE), її відносне значення (RMSE %) та коефіцієнт детермінації r^2 , які дозволяють оцінити отриману модель [37].

Для розрахунку показників біорізноманіття використано програмний пакет PAST 4.03. Для картографічної візуалізації даних використано програмний пакет Q-GIS 3.34.15.

Виклад основного матеріалу. Родина Lumbricidae охоплює великий ареал земної кулі з фактично придатними для життєдіяльності ділянками суші, що свідчить про виняткову екологічну пристосованість дощових черв'яків. Існування у межах родини видів із широкими межами ареалу вказує на наявність відмінностей у пристосованості окремих видів до різних умов існування [17]. На досліджуваній території міста виявлено десять видів дощових черв'яків, що належать до шести родів (Aporrectodea, Lumbricus, Octolasion, Dendrobaena, Eisenia та Eiseniella) родини Lumbricidae: *Aporrectodea caliginosa* (Savigny, 1826) (частота трапляння – 91,31%), *A. rosea* (Savigny, 1826) (49,30%), *A. trapezoides* (Duges, 1828) (10,41%), *Lumbricus terrestris* (Linnaeus, 1758) (33,33%), *L. castaneus* (Savigny, 1826) (9,02%), *L. rubellus* (Savigny, 1826) (2,08%), *Octolasion lacteum* (Örley, 1885) (4,51%), *Dendrobaena octaedra* (Savigny, 1826) (7,98%), *Eisenia fetida* (Savigny, 1826) (2,77%) та *Eiseniella tetraedra* (Savigny, 1826) (2,08%) (рис. 3).

Для оцінки біорізноманіття комплексів дощових черв'яків в урбоєкосистемі міста Житомира розраховано 7 стандартних параметрів: число особин у вибірці, число видів у вибірці та сім індексів біорізноманіття (табл. 1). Як видно з наведених даних число особин у вибірці варіювало в широких межах від 1 до 29 екземплярів. Однак середнє значення (5,82 екз.) свідчить про достатньо низьку чисельність досліджуваних тварин у більшості проб. Аналогічна закономірність спостерігається і стосовно числа видів, відмічених у пробі. Максимальне число зареєстрованих видів становило шість, тоді як середнє значення – лише 2,15. Це доводить, що видова різноманітність дощових черв'яків у більшості аналізованих проб також низька. Що стосується індексів біорізноманіття, то серед 330 проаналізованих проб зустрічаються різноманітні їх значення починаючи від вирівняної структури комплексу з майже не вираженими домінантами до комплексів з чітко вираженими домінантами і крайнього варіанту – моновидового комплексу (табл. 1).

Така різноманітність структури комплексів, свідчить, що територія міста є дуже неоднорідною за екологічними умовами. У більшості випадків ці умови не дуже сприятливі для дощових черв'яків, про що свідчить низька їх чисельність і видова різноманітність та чітко виражені домінанти. В ряді випадків умови існування навпаки є сприятливими, що проявляється у зростанні чисельності та видової різноманітності

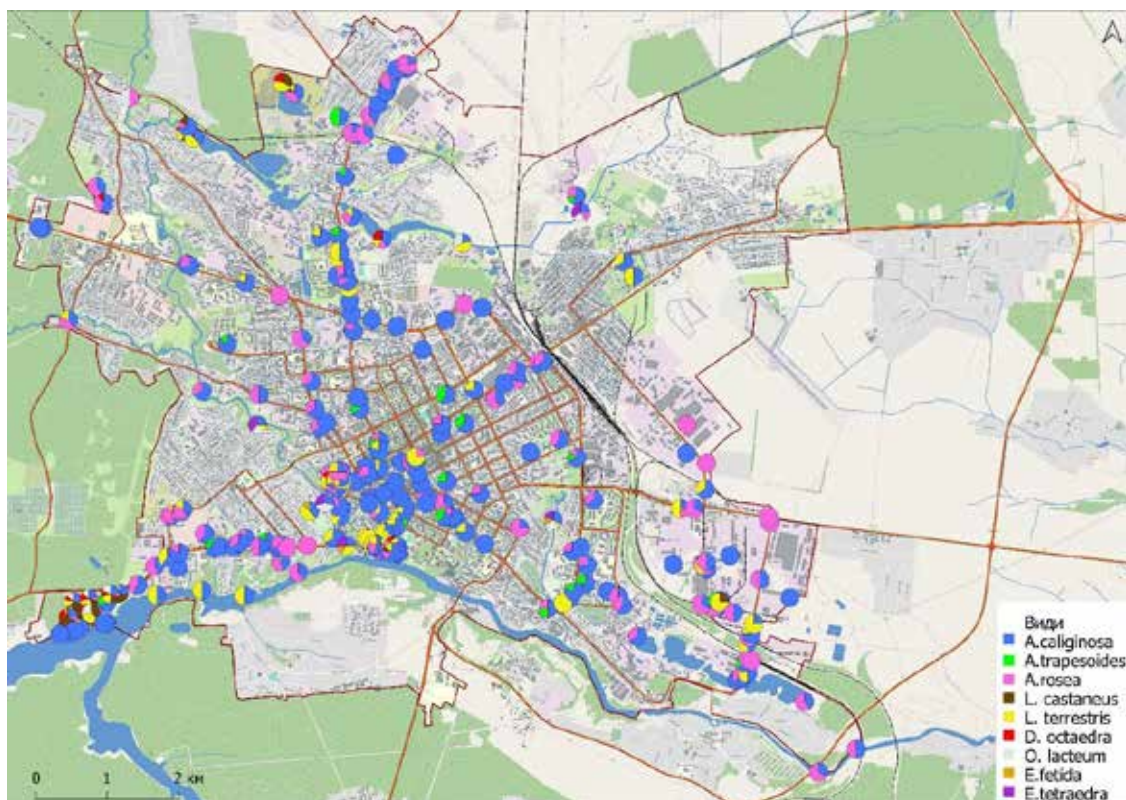


Рис. 3. Представленість у пробах виявлених видів дощових черв'яків

Таблиця 1

Статистичні оцінки показників біорізноманіття комплексів дощових черв'їв міста Житомира

Показники	Mean	Min	Max	SE
Число видів	2,15	1,00	6,00	0,06
Число особин	5,82	1,00	29,00	0,22
Індекс домінування	0,62	0,19	1,00	0,01
Індекс Шенона	0,59	0,00	1,73	0,02
Індекс Брілуїна	0,41	0,00	1,43	0,02
Індекс Менхініка	0,93	0,35	1,79	0,02
Індекс Маргалефа	0,65	0,00	1,90	0,03

Таблиця 2

Оцінки отриманих моделей просторового розподілу показників біорізноманіття

Параметр біорізноманіття	R ²	RMSE	RMSE %
Число видів	0,92	0,32	14,88
Число особин	0,93	0,96	16,49
Індекс домінування	0,93	0,08	12,90
Індекс Шенона	0,92	0,15	25,42
Індекс Брілуїна	0,92	0,10	24,39
Індекс Менхініка	0,92	0,11	11,83
Індекс Маргалефа	0,92	0,18	27,69

цих організмів. Очікуваною є мозаїчність просторового розподілу показників біорізноманіття, оскільки біотопи урбоєкосистеми сильно фрагментовані дорожньою мережею та забудовою. Саме це послужило підставою для більш детального аналізу закономірностей просторового розподілу досліджуваних показників.

Використання методу машинного навчання Random Forest дозволило отримати достатньо надійну регресійну модель просторового розподілу показників біорізноманіття. У всіх випадках значення коефіцієнту детермінації (R^2) перевищувало 0,92 (табл. 2, рис. 4), а отже отримана модель здатна пояснити понад 90% варіації залежної змінної.

Оскільки на значення коефіцієнта детермінації суттєво впливає кількість використаних предикторів, для оцінки моделі нами також використано корінь середньої квадратичної похибки (RMSE), який розраховується в одиницях прогнозованого показника, що ускладнює порівняння показників з різною розмірністю. Тому на його основі розраховано відносну середню квадратичну похибку (RMSE %), як відсоток від середнього значення показника. Цей показник оцінює середнє відхилення у відсотках між прогнозованим та фактичним значенням. У нашому випадку значення RMSE % достатньо низькі і коливаються від 11,83 до 27,69, що свідчить про достатньо високу ефективність моделі (табл. 3).

Як видно з рис. 5, отримана модель дозволяє достатньо надійно прогнозувати значення показників біорізноманіття для комплексів дощових черв'їв

на досліджуваній території. Модель просторового розподілу чисельності дощових черв'їв (рис. 5.1) свідчить, що у сильно фрагментованих біотопах у зонах щільної дорожньої мережі та забудови значення цього показника мінімальне.

Воно закономірно зростає в зелених зонах міста та в заплавах річок. Це цілком закономірний результат, оскільки у вказаних зонах міста спостерігається менш інтенсивний антропогенний вплив на середовище існування дощових черв'їв, а також вища вологість ґрунту, що сприятливо позначається на чисельності педобіонтів. Подібний характер просторового розподілу спостерігається і у випадку числа виявлених видів (рис. 5.2).

Що стосується індексів біорізноманіття, то у цьому випадку спостерігається два протилежних типи просторового розподілу. У випадку індексу домінування мінімальні значення показника спостерігаються в біотопах, які менше піддаються антропогенному навантаженню (рис. 5.3). Так в долинах річок і зелених зонах міста, для яких характерна вища загальна чисельність та видова різноманітність дощових черв'їв доміанти менш виражені і відповідно значення індексу домінування є низькими. По мірі зростання антропогенного навантаження та фрагментації біотопів дорожньою мережею та забудовою доміанти стають більш вираженими до моновидових комплексів включно. У випадку інших аналізованих індексів спостерігається протилежний тип просторового розподілу. Наприклад, значення індексу Шенона (рис. 5.4) закономірно знижуються по мірі збіднення видової різноманітності комплек-

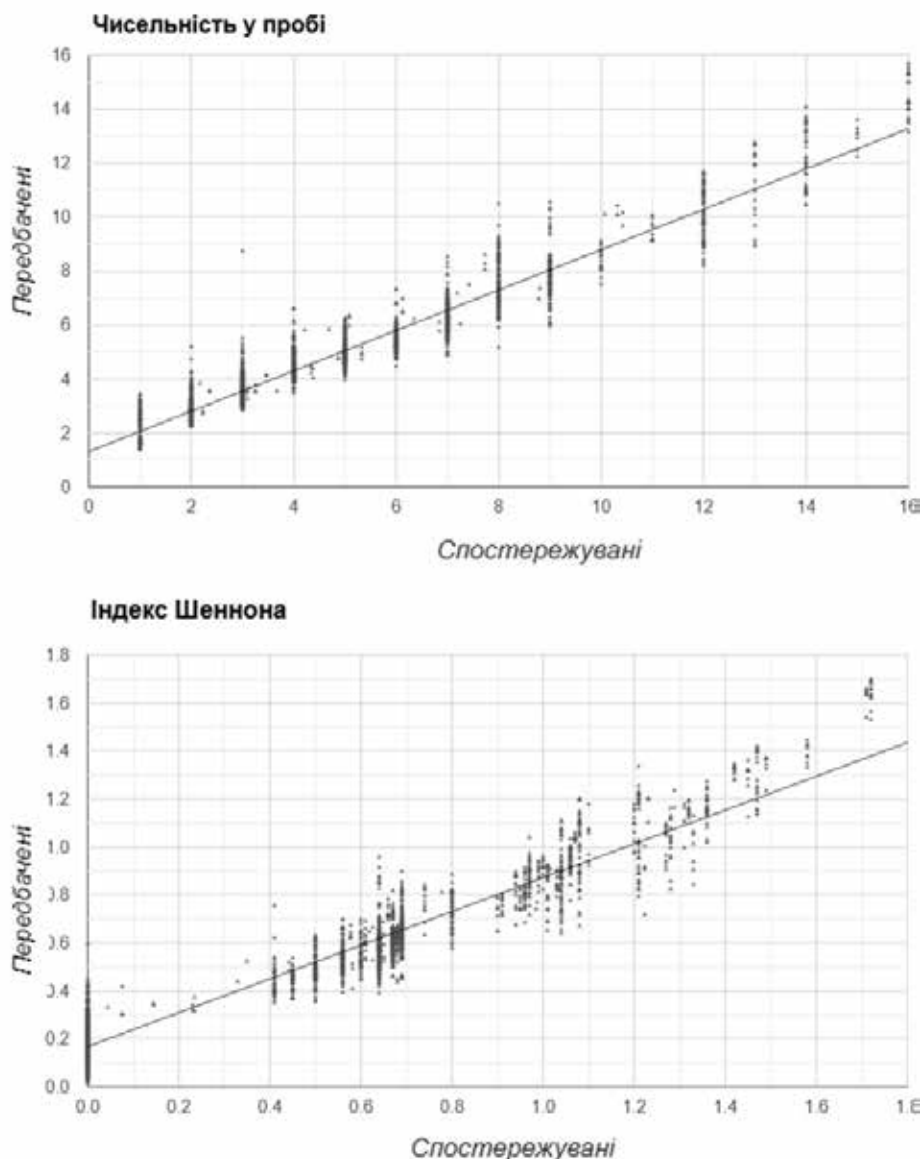


Рис. 4. Приклади кореляційних полів спостережуваних та прогнозованих значень показників біорізноманіття для отриманої регресійної моделі

сів дощових черв'яків в умовах підвищеного антропогенного навантаження.

Головні висновки. У результаті дослідження фауни дощових черв'яків в урбанізованому середовищі міста Житомира встановлено, що вона представлена десятьма видами, що належать до шести родів родини Lumbricidae: *A. caliginosa*, *A. rosea*, *A. trapezoides*, *L. terrestris*, *L. castaneus*, *L. rubellus*, *O. lacteum*, *D. octaedra*, *E. fetida* та *E. tetraedra*. Число особин у вибірці варіювало в широких межах (від 1 до 29 екз.) при середньому значенні – 5,82 екз., що свідчить про достатньо низьку чисельність досліджуваних тварин у більшості випадків. Видова різноманітність дощових черв'яків у більшості аналізованих проб також низька (максимальне число видів – 6, середнє значення – 2,15).

Значення використаних індексів біорізноманіття свідчать, що на досліджуваній території структура комплексів дощових черв'яків варіює від вирівняної з майже не вираженими домінантами до комплексів з чітко вираженими домінантами (моновидових включно).

Використання методу машинного навчання Random Forest дозволило отримати ефективну та надійну регресійну модель просторового розподілу показників біорізноманіття ($R^2 > 0,92$, RMSE % = 11,83 – 27,69), яка здатна пояснити понад 90% варіації залежної змінної. Прогноз, отриманий на основі моделі свідчить, що осередками біорізноманіття в урбоєкосистемі міста Житомира є зелені зони та долини річок, які менше піддаються антропогенному навантаженню і характеризуються

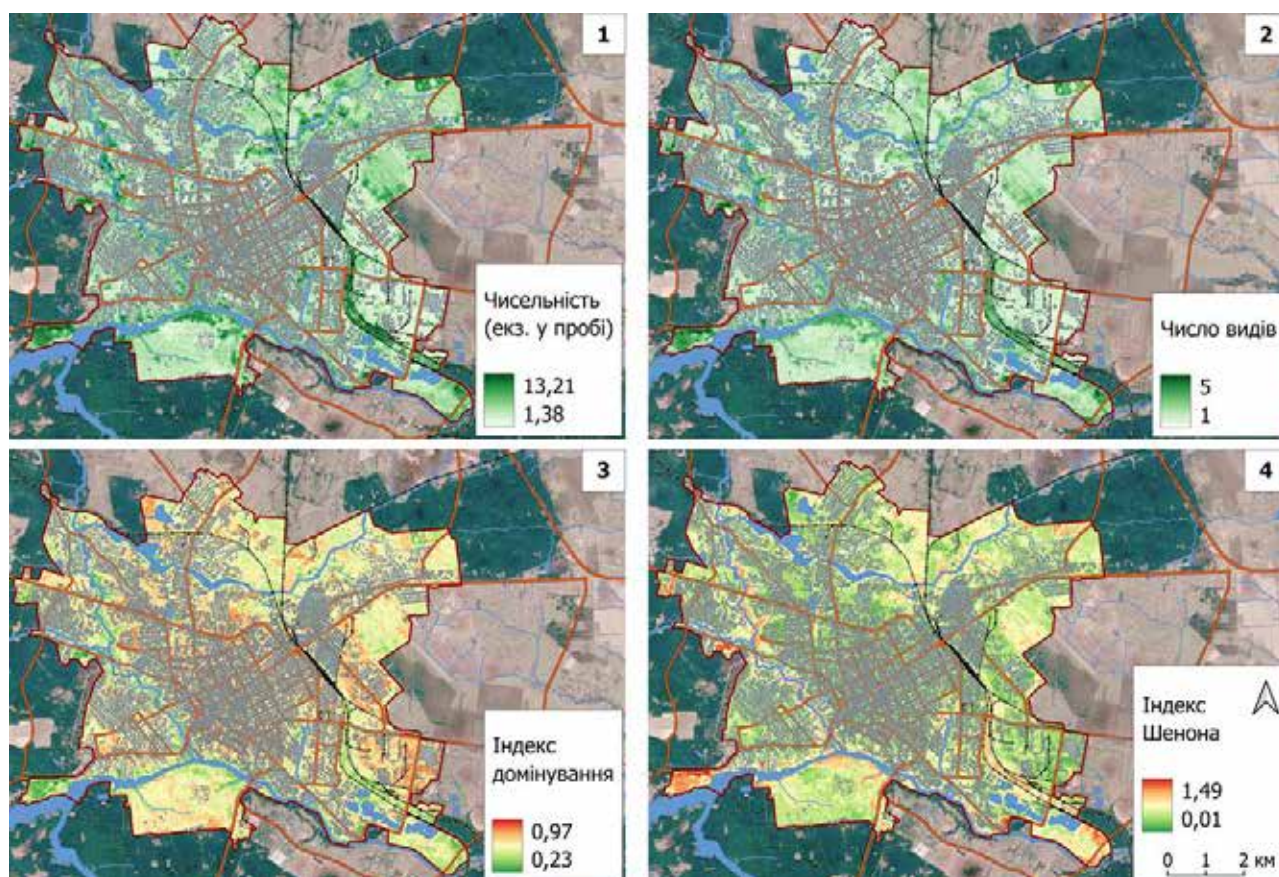


Рис. 5. Приклади картографічної візуалізації моделей просторового розподілу показників біорізноманіття

сприятливішими для дощових черв'яків едафічними умовами.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати можуть бути використані при проведенні подальших локальних досліджень фауни дощових черв'яків в урбоценозах України.

Запропонована методологія моделювання показників біорізноманіття на основі методу машинного навчання Random Forest може застосовуватись для моделювання показників біорізноманіття не лише дощових черв'яків, але й широкого спектру інших груп біонтів як в урбанізованому середовищі, так і в природних біотопах.

Література

1. Ellis E.C. Ecology in an anthropogenic biosphere. *Ecological Monographs*. 2015. Vol. 85(3). P. 287–331. DOI: 10.1890/14-2274.1.
2. Schittko C., Onandia G., Bernard-Verdier M., Heger T., Jeschke M.J., Kowarik I., Maaß S., Joshi J. Biodiversity maintains soil multifunctionality and soil organic carbon in novel urban ecosystems. *Journal of Ecology*. 2022. Vol. 110(4). P. 916–934. DOI: 10.1111/1365-2745.13852.
3. Колодочка О.М. Еколого-гігієнічна оцінка забруднення ґрунту і суміжних об'єктів довкілля важкими металами та їх впливу на здоров'я населення в умовах техногенного навантаження: дис. ... канд. мед. наук: 03.00.16. Київ, 2004. 185 с.
4. Hansen A.J., Knight R.L., Marzluff J.M., Powell S., Brown K., Gude P.H., Jones K. Effects of exurban development on biodiversity: Patterns, mechanisms, and research needs. *Ecological Applications*. 2005. Vol. 15(6). P. 1893–1905. DOI: 10.1890/05-5221.
5. Стернік В.М. Біотична активність урбоедафотопів міста Рівне: дис. ... канд. біол. наук: 03.00.16. Рівне, 2017. 179 с.
6. Wall D.H., Nielsen U.N., Six J. Soil biodiversity and human health. *Nature*. 2015. Vol. 528. P. 69–76. DOI: 10.1038/nature15744.
7. Benítez-López A., Santini L., Schipper A.M., Busana M., Huijbregts M.A.J. Intact but empty forests? Patterns of hunting-induced mammal defaunation in the tropics. *PLoS Biol.* 2019. Vol. 17(5). P. e3000247. DOI: 10.1371/journal.pbio.3000247.
8. Chaudhary S., McGregor A., Houston D., Chettri N. The evolution of ecosystem services: a time series and discourse-centered analysis. *Environ. Sci. Pol.* 2015. Vol. 54. P. 25–34. DOI: 10.1016/j.envsci.2015.04.025.
9. Groombridge B., Jenkins M.D. World Atlas of Biodiversity. Prepared by the UNEP World Conservation Monitoring Centre. University of California Press, Berkeley, USA. 2002. 360.
10. Condro A.A., Tsuyuki S. Projected impacts of climate change and anthropogenic effects on habitat distribution of endangered Javan Hawk-Eagle in Indonesia. *Geography and Sustainability*. 2024. Vol. 5(2). P. 241–250. DOI: 10.1016/j.geosus.2024.01.009.
11. Мірзак О.В. Екологічні особливості едафотопів урбанізованих територій степової зони України (на прикладі м. Дніпропетровська): автореф. дис. ... канд. біол. наук: 03.00.16. Дніпропетровськ, 2001. 19 с.

12. Nagendra H. Using remote sensing to assess biodiversity. *International Journal of Remote Sensing*. 2001. Vol. 22(12). P. 2377–2400. DOI: 10.1080/01431160117096.
13. Тітенко Г.В. Оцінка екологічного стану міських ґрунтів як засіб оптимізації території. *Вісник Сумського державного університету. Технічні науки*. 2006. № 5(89). С. 149–152.
14. Fründ H.C., Egbert E., Dümbeck G. Spatial distribution of earthworms [Lumbricidae] in recultivated soils of the Rhenish lignite-mining area, Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2004. Vol. 167(4). P. 494–502. DOI: 10.1002/jpln.200421372.
15. Schlaghamerský J., Pižl V. Enchytraeids and earthworms (Annelida: Clitellata: Enchytraeidae, Lumbricidae) of parks in the city of Brno, Czech Republic. *Soil Organisms*. 2009. Vol. 81. P. 145–173.
16. Гарбар О., Мороз В., Гарбар Д., Ворончук Л., Даниловська Н. Структура угруповань дощових черв'яків в урбанізованих біотопах Центрального Полісся. *GEO&BIO*. 2023. Т. 24. С. 173–182. DOI: 10.15407/gb2412.
17. Жуков О.В., Пахомов О.Є., Кунах О.М. Біологічне різноманіття України. Дніпропетровська область. Дощові черв'яки (Lumbricidae): монографія / за заг. ред. проф. О.Є. Пахомова. Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту, 2007. 371 с.
18. Tresch S., Moretti M., Bayon Le R.C., Mäder P., Zanetta A., Frey D., Fliessbach A. A gardener's influence on urban soil quality. *Front. Environ. Sci.* 2018. Vol. 6. P. 25. DOI: 10.3389/fenvs.2018.00025.
19. Smetak K.M., Johnson-Maynard J.L., Lloyd J.E. Earthworm population density and diversity in different-aged urban systems. *Appl. Soil Ecol.* 2007. Vol. 37. P. 161–168. DOI: 10.1016/j.apsoil.2007.06.004.
20. Lembrechts J.J., Alexander J.M., Cavieres L.A., Haider S., Lenoir J., Kueffer C., McDougall K., Naylor B.J., Nuñez M.A., Pauchard A., Rew L.J., Nijs I., Milbau A. Mountain roads shift native and non-native plant species' ranges. *Ecography (Cop.)*. 2017. Vol. 40. P. 353–364. DOI: 10.1111/ecog.02200.
21. Turner W., Spector S., Gardiner N., Fladeland M., Sterling E., Steininger, M. Remote sensing for biodiversity science and conservation. *Trends in Ecology & Evolution*. 2003. Vol. 18(6). P. 306–314. DOI: 10.1016/S0169-5347(03)00070-3.
22. Dirnböck T., Dullinger S., Grabherr G. A regional impact assessment of climate and land use change on alpine vegetation. *Journal of Biogeography*. 2003. Vol. 30(3). P. 401–417. DOI: 10.1046/j.1365-2699.2003.00839.x.
23. Graves J.S., Asner P.G., Martin E.R., Anderson B.Ch., Colgan S.M., Kalantari L., Bohlman A.S. Tree Species Abundance Predictions in a Tropical Agricultural Landscape with a Supervised Classification Model and Imbalanced Data. *Remote Sensing*. 2016. Vol. 8(2). P. 161. DOI: 10.3390/rs8020161.
24. Костріков С.В. Геоінформаційне моделювання природно-антропогенного довкілля: монографія. Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2014. 484 с.
25. Lozano-Jaramillo M., Bastiaansen J.W.M., Dessie T., Komen H. Use of geographic information system tools to predict animal breed suitability for different agro-ecological zones. *Animal*. 2019. Vol. 13(7). P. 1536–1543. DOI: 10.1017/S1751731118003002.
26. Roy P.S., Tomar S. Biodiversity Characterisation at Landscape level using Geospatial Modelling Technique. *Biological Conservation*. 2000. Vol. 95. № 1. P. 95–109. DOI: 10.1016/S0006-3207(99)00151-2.
27. Roy P.S., Behera M.D. Assessment of biological richness in different altitudinal zones in the Eastern Himalayas, Arunachal Pradesh, India. *Current Science*. 2005. Vol. 88(2). P. 250–257.
28. Yang X., Skidmore A.K., Melick D.R., Zhou Z., Xu J. Mapping non-wood forest product (matsutake mushrooms) using logistic regression and a GIS expert system. *Ecological Modelling*. 2006. Vol. 198. P. 208–218.
29. Porwal M.C., Sharma L., Roy P.S. Stratification and mapping of Ephedra gerardiana Wall. in Poh (Lahul and Spiti) using remote sensing and GIS. *Current Science*. 2013. Vol. 84. № 2. P. 208–212.
30. Sahragard H.P., Zare Chahouki M.A. An evaluation of predictive habitat models performance of plant species in Hoze soltan rangelands of Qom province. *Ecological Modelling*. 2015. Vol. 309–310. P. 64–71. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2015.04.005.
31. Gamal E., Khderi G., Morsy A., Ali M., Hashim A., Saleh H. GIS based modelling to aid conservation of two endangered plant species (*Ebenus armitagei* and *Periploca angustifolia*) at Wadi Al-Afreet, Egypt. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. Vol. 19. 2020. P. 100336. DOI: 10.1016/j.rsase.2020.100336.
32. Гарбар О.В., Романюк Р.К., Доценко І.Б. Інвазійний потенціал *Darevskia Armeniaca* (Méhely, 1909) в Україні: оцінка на основі ГІС-моделювання екологічної ніші. *Український журнал природничих наук*. 2022. № 1. С. 43–59. DOI: 10.35433/naturaljournal.1.2023.43-59.
33. Kalivas D.P., Apostolopoulos C.D. The use of GIS to improve the resources utilisation of mountain areas: the case of sheep and goat breeding in the Greek regions of Thessaly and Epirus. *The European Association for Animal Production*. 2005. Vol. 115. P. 466–472. DOI: 10.3920/9789086865611_085.
34. Cringoli G., Rinaldi L., Musella V., Veneziano V., Maurelli M.P., Pietro Di F., Frisiello M., Pietro Di S. Geo-referencing livestock farms as tool for studying cystic echinococcosis epidemiology in cattle and water buffaloes from southern Italy. *Geospatial Health*. 2007. Vol. 2(1). P. 105–111. DOI: 10.4081/gh.2007.259.
35. Bertaglia M., Joost S., Roosen J. Identifying European marginal areas in the context of local sheep and goat breeds conservation: a geographic information system approach. *Agricultural Systems*. 2007. Vol. 94(3). P. 657–670.
36. Pitt J., Gillingham P., Maltby M., Stewart J.R. New perspectives on the ecology of early domestic fowl: an interdisciplinary approach. *Journal of Archaeological Science*. 2016. Vol. 74(9). P. 1–10. DOI: 10.1016/j.jas.2016.08.004.
37. Shendryk Y. Fusing GEDI with earth observation data for large area aboveground biomass mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022. Vol. 115(6). P. 103108. DOI: 10.1016/j.jag.2022.103108.
38. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 202. P. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
39. Gandhi U. Estimating Above Ground Biomass using Random Forest Regression in GEE. URL: <https://spatialthoughts.com/2024/02/07/agb-regression-gee/> (дата звернення: 15.10.2024).