

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В.Н. КАРАЗИНА
Біологічний факультет
Кафедра зоології та екології тварин

**Аналіз параметрів середовища як умов мешкання популяції
бабака (*Marmota bobak* Mull., 1776) у північно-східній частині Харківської
області**

Допущена до захисту
«__»_____20__ р.
Завідувач кафедри зоології та
екології тварин
_____ Д.А.Шабанов

Дипломна робота
магістранта кафедри
Шабанова В.Д.

Науковий керівник:
к.б.н., доцент
кафедри зоології та екології
тварин
Атемасова Т. А.

Харків 2024

Анотація

Магістерська робота присвячена дослідженню динаміки популяції *Marmota bobak* та придатних для їх існування степових ділянок у Куп'янському районі Харківської області за допомогою космічного зондування. Метою роботи є аналіз змін чисельності бабаків і визначення територій, сприятливих для їх проживання, з урахуванням можливих впливів, зокрема бойових дій. Для досліджень використовувались космічні знімки, отримані з Google Maps, Bing Maps та ArcGIS Pro, а також дані про координати нір, зібрані в 2016 році. Проведено геоприв'язку зображень та нанесення точок нір у програмі ArcGIS Pro, після чого виконана кластеризація даних у середовищі R для визначення групування нір. Робота включає аналіз змін у популяції за 2018, 2020 та 2023 роки, встановлення відповідностей між даними космічного зондування та польовими спостереженнями, а також виділення ознак, що характеризують придатні для бабаків ділянки степу.

Загальний обсяг роботи становить 64 сторінки, на яких наведено 22 рисунки та 3 таблиці. Список літератури налічує 59 джерел, з них 38 – мовами на основі латинського алфавіту.

Ключові слова: бабак степовий, динаміка популяції, дистанційне зондування, придатність середовищ, екологічний аналіз, природоохоронна біологія, степові екосистеми, географічні інформаційні системи (ГІС), зусилля з реінтродукції, антропогенний вплив

SUMMARY

This master's thesis is dedicated to the study of the dynamics of Marmota bobak populations and the steppe areas suitable for their existence in the Kupyansk district of Kharkiv region through remote sensing. The aim of the research is to analyze changes in the population density of Marmota bobak and to identify territories favorable for their habitation, taking into account possible influences, including military activities.

The study utilizes satellite imagery obtained from Google Maps, Bing Maps, and ArcGIS Pro, as well as data on burrow coordinates collected with infield methods in 2016 and in 2017.

Georeferencing of images and plotting of burrow locations were conducted using ArcGIS Pro, followed by data clustering in R to determine burrow groupings.

The study revealed significant burrow density in the years that were studied and established correlations between remote sensing data and field observations. Additionally, it highlighted environmental parameters critical for marmot habitation and identified potential areas for conservation efforts based on comprehensive assessments of habitat suitability.

The study comprises a total of 64 pages, featuring 22 figures and 3 tables. The reference list includes 59 sources 38 of them are in languages based on the Latin alphabet.

Keywords: Marmota bobak, Population dynamics, Remote sensing, Habitat suitability, Ecological analysis, Conservation biology, Steppe ecosystems, Geographic Information Systems (GIS), Reintroduction efforts, Anthropogenic impact

ЗМІСТ

Анотація	2
ЗМІСТ	3
ВСТУП	4
1. ОГЛЯД І АНАЛІЗ НАУКОВОЇ ЛІТЕРАТУРИ	6
1.1 Загальна характеристика бабака степового	6
1.2 Особливості поширення бабака на території України	8
1.3 Акліматизація та реакліматизація бабака	10
1.4 Огляд існуючих методів дослідження популяцій бабаків	13
1.5 Сучасні методи дослідження	15
1.6 Використання матеріалів космічного зондування для оцінки чисельності норних тварин	17
2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ	20
2.1 Отримання даних для дослідження	20
2.2 Аналіз динаміки кількості нор бабаків	21
2.3 Аналіз ділянок степової рослинності	22
2.4 Побудова моделі географічного поширення бабака	23
2.5 Оцінка якості побудованих моделей	25
3. РЕЗУЛЬТАТИ	26
3.1 Аналіз динаміки чисельності нор бабаків	26
3.2 Аналіз рослинності степових ділянок	36
3.3 Моделі розселення бабаків	39
4. ОБГОВОРЕННЯ	44
4.1 Тренди зміни кількості сімейних ділянок бабаків	44
4.2 Основні обмеження методу аналізу космічних знімків	45
4.3 Оцінка та динаміка основних типів рослинних умов	46
4.4 Оцінка результатів моделювання розселення бабаків	47
4.4.1 Оцінка моделі 1	47
4.4.2 Оцінка моделі 2	48
4.5 Визначення придатних для розселення бабаків ділянок	49
ВИСНОВКИ	53
ПОДЯКИ	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	55

ВСТУП

Бабаки роду *Marmota* (Blumenbach, 1779) являють собою групу степових гризунів середнього розміру, поширену на степах Європи та Північної Америки. На території північно - східної України поширений бабак степовий (*Marmota bobak* (Müller, 1776)), який живе на неораних степах Харківської та Луганської області.

Бабаки ведуть норний стиль життя, самостійно риючи свої нори. Для риття нір бабаки використовують дрібноземлисті ґрунти, але вони можуть заселяти і більш тверді породи – кам'янисті щебенисті осипи й розсипи, кам'янисті русла гірських водотоків, особливо часто щебенисті – або галечно-мелкоземлисті наноси – морени, колювій і делювії гірських схилів, алювіальні й пролювіальні відкладення.

Через вимоги бабаків до якості середовища проживання, вони заселяють локальні придатні ділянки, що призводить до поділу на окремі поселення. Усередині цих поселень бабаки живуть родинами, утворюючи певні соціальні структури (Armitage, 1999).

Питання оцінки чисельності бабаків та факторів, що впливають на її динаміку, є важливими для розуміння їх екологічного стану. Традиційні методи польових досліджень виду наразі не завжди можливо застосувати. Отже, ми застосували можливості космічного зондування для отримання актуальної інформації про розповсюдження виду. Зокрема, ми намагалися оцінити чисельність поселень, щільність їх розташування, а також загальне розповсюдження колоній бабака. За нашими припущеннями, можливою є побудова моделі прогнозу розселення бабака на підставі аналізу параметрів середовища.

Мета дослідження полягає у визначенні основних параметрів середовища *Marmota bobak* шляхом аналізу даних космічного зондування земної поверхні для подальшого використання в моделюванні їх ареалів.

Завдання включають:

- Визначення ключових параметрів середовища у актуальних місцях реєстрації бабаків.
- Аналіз факторів, які найбільше впливають на вибір місцепомешкань бабаком.
- Оцінка основних типів рослинних умов місцепомешкань з урахуванням наявності поселень бабаків та їх динаміки за 1-5 років на досліджуваній території.
- Визначення ділянок, які за сукупністю ключових факторів можуть бути потенційно придатними для *Marmota bobak*, та їх порівняння з реальною картиною розповсюдження виду на модельній території.

1. ОГЛЯД І АНАЛІЗ НАУКОВОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Загальна характеристика бабака степового

Бабак степовий (*Marmota bobak* (Müller, 1776)) – гризун середнього розміру (довжина тіла до 61 см, вага до 9,3 кг) з родини Вивіркові, що має гнучке обтічне тіло й не дуже довгий хвіст (менше $\frac{1}{2}$ довжини тіла). Тулуб вкритий однотонним піщано-жовтим хутром, яке є більш довгим на спині і боках і коротшим на череві. Хвіст вкритий довгим жорстким волоссям, яке знизу не має “розчісу” (розпадання на два боки), характерного для інших представників Вивіркових. Голова сурка є досить великою, дещо сплюснена за формою, несе великі очі, що розташовані високо, а також невеликі заокруглені вушні раковини, які вкриті жорстким коротким волоссям і ледве виступають над поверхнею хутра (Токарський, 1997).

Для риття нір бабаки віддають перевагу м'яким ґрунтам, але також можуть заселяти кам'янисті осипи й розсипи, а також кам'янисті русла гірських водотоків (Токарський, 1997).

Майже 90% свого життя бабаки проводять у норах, серед яких можна виділити декілька типів за їхнім призначенням і складністю. Тимчасові невеликі захисні (кормові) нори не мають гніздової камери та мають лише один вхід, серед постійних (гніздових) нор розрізняють літні (виводкові) нори, які представлені складною системою ходів, мають гніздову камеру і сполучені із поверхнею багатьма (до 6-15) виходами, та зимові нори, що зазвичай влаштовані простіше, але їхня гніздова камера розташована на великій глибині (5-7 м) (Токарський, 1997). Під час облаштування складної нори на поверхню викидається до десятка кубометрів ґрунту, з якого утворюється великий

пагорб висотою 1 м або більше й 8-15 м у діаметрі, який виділяється серед оточуючого степу своїм темно-зеленим кольором. Ці пагорби можна побачити навіть через 100 років після зникнення бабаків на певній території (Брандлер, 2012).

Бабаки харчуються переважно свіжою зеленою масою трав'янистих рослин, вибірково поїдаючи різні частини рослин на різних стадіях їхнього росту. Важливим аспектом їхньої життєдіяльності є накопичення жирових запасів під час наземної активності, що забезпечує енергетичні витрати під час сплячки і в малокормний весняний період. Перед заляганням у сплячку загальна вага жиру в бабака становить 800–1200 г, що становить 20% від його ваги, а навесні – 100–200 г, або 2% ваги.

Основою будь-якого територіального угруповання бабаків є родина, що складається з 2-20 особин (разом із бабачатами), які живуть на одній території, зазвичай є близькими родичами та зимують разом. У родині завжди розмножується одна самиця, хоча іноді можуть розмножуватися декілька самиць й утворюються 2-3 внутрішньородинні групи (Токарський, 2002). Близько розташовані родини часто обмінюються своїми членами, й бабаки не виявляють агресії до бабаків з інших родин. Окремі родини разом утворюють колонії.

Типовим місцеперебуванням бабака є переважно відкриті сухі степи та луки. Його природні поселення зустрічаються в степових екосистемах, де він є важливим компонентом зв'язків між рослинами та тваринами (Ronkin et al, 2020). Історично бабак населяв велику частину степової зони Європи й Азії (від Угорщини на заході до р. Іртиш на сході), але через відлов людиною та розорювання цілинного степу його ареал дуже скоротився і зараз представлений окремими ділянками між р. Сіверський Донець та р. Волга на неораних землях в Луганській, Донецькій та Харківській областях України

(Vasyliuk et al. 2024), а також бабак є чисельним у Північному й Центральному Казахстані (Ronkin et al, 2020). Тому виділяються два добре відокремлених підвиди: європейський байбак (*Marmota b. bobak* (Müller, 1776)) і казахстанський бабак (*Marmota b. shangensis* Bazhanov, 1930).

1.2 Особливості поширення бабака на території України

Викопні рештки бабаків з території України відомі ще з плейстоцену та голоцену. Вважається, що у цей доісторичний період бабак населяв степи й лісостепи від Карпат на заході до східних кордонів України й від південної межі Українського Полісся до Чорного й Азовського морей (Токарський, 2004). Із початком освоєння степу людиною бабак став важливою мисливською твариною, і його чисельність почала поступово зменшуватися: припускають, що бабак почав потерпати від людини ще за часів Київської Русі, під час монголо-татарської навали тиск трохи зменшився, а потім знову поновився, але досить довго цей вид був чисельним по всій території України. З початку XIX ст. бабак почав зникати на Правобережжі, і хоча він все ще зустрічався у різних локаціях на Лівобережжі, переважна більшість заселяла північно-східний край степової зони України. На початку XX ст. тварина зникла майже усюди і збереглася лише у двох місцях у Харківській та Луганській області, завдяки тому, що тут були розташовані конні заводи, розташовані на цілинних землях, та яружно-балкова система, де розорювання є досить складним (Токарський, 2004).

Ймовірно саме це визначило подальшу долю бабака на території України та суміжних територіях: витиснення бабаків з рівнинного степу до балок сприяло освоєнню нового типу мешкання (Токарський, 2005). Можна сказати, що усі наявні в Україні поселення степового бабака належать до

балкового (стрічкового) типу розташування поселень, при цьому окремі колонії тварин відокремлені одна від одної територією, що є непридатною для їхнього життя. У цьому полягає відмінність від степів Казахстану, для яких є характерним дифузний (степовий) тип розташування поселень, де тварини розподілені рівномірно (через однорідність ландшафту) (Савченко та ін. 2008). На теперішній час популяції бабаків зосереджені на землях, не придатних для сільського господарства - в ярах, балках та інших природних територіях.

Окрім екологічної пластичності самого бабака на чисельність та поширення його популяцій вплинули заходи з охорони та розселення, що розпочалися ще у 20-30 рр. XX ст. На території Старобільських конних заводів (Луганська обл.) ще у 1923 р. був заснований "Стрільцівський степ" - бабаковий заповідник місцевого значення. Також у 1976 р. були затверджені два заказники республіканського значення в Харківській області між селами Катеринівка та Великий Бурлук (Токарський, 1997). На теперішній час бабаки мешкають на території таких природоохоронних територій як національний природний парк "Дворічанський", регіональний ландшафтний парк "Великобурлуцький степ" і Луганський заповідник. Слід зазначити, що збереженню бабака сприяло штучне розселення (Токарський, 2019).

Протягом XX ст. чисельність бабака почала поступово збільшуватися й він став природним чином розширювати свій ареал: розселився по степовим районам Харківської й Луганської областей, відбулося об'єднання популяцій цих двох областей, з Луганської області він поширився на територію сумжніх областей Росії (Воронезьку, Ростовську та Білгородську). На межі століть загальна чисельність популяцій бабаків на території України сягнула свого максимуму понад 100 тис. особин (Токарський, 2004).

Натомість в останні десятиріччя спостерігається різке скорочення чисельності бабака, яке пов'язане зі змінами у структурі землекористування на

місцях перебування виду. Бабаки зазвичай віддають перевагу відкритим просторам з короткою травою, де вони можуть легко спостерігати за потенційними загрозами. Крім того, дуже важливою є специфічна кормова база, що складається з пасовищно-лучних угруповань рослин. Саме такі умови для життя бабаків створює помірний випас худоби, що відбувався саме на територіях (балки, яри), де мешкає ця тварина. Відмова від випасу худоби призводить до збільшення висоти трави та покриття схилів неїстівними видами рослин, що значно погіршує умови для проживання бабака (Ronkin et al, 2010; Savchenko et al., 2018). Крім того, у високій траві байбачата, особливо у перші місяці свого життя стають легкою здобиччю хижаків (лисиць, тхорів, собак). Це, в свою чергу, знижує репродуктивний успіх і може призвести до подальшого зменшення чисельності популяції. У 2020 році бабак був занесений до Червоної книги України (Про затвердження..., 2021).

1.3 Акліматизація та реакліматизація бабака

Можливості природного розселення степового бабака є обмеженими, оскільки придатні для його існування місця віддалені одне від одного. Саме тому іншим успішним напрямом для збереження і відновлення широкого ареалу бабака стали заходи з його реінтродукції (реакліматизації): інтенсивні роботи з реінтродукції бабака проводилися в Україні, Казахстані та в Росії наприкінці ХХ ст. (Токарський та ін., 2019).

Історія акліматизації та реакліматизації бабака в Україні нараховує вже майже століття. Перші експерименти з випуском бабаків здійснював ще сам Ф. Фальц-Фейн на території Асканії-Нова, але вони не змогли там закріпитися. Потім було ще декілька більш вдалих спроб реакліматизації (або акліматизації) на території заповідника, популяція проіснувала більше 20

років, але потім зникла з невідомих причин (Токарський, 1998). До 1980-х років реінтродукція степових бабаків в Україні часто проходила без належної документації та мала спонтанний характер та у переважній більшості випадків була невдалою (Грубник та ін., 2020).

Лише з 1988 р., коли Українське товариство мисливців і рибалок почало контролювати процес, реінтродукція стала регулярною: основними джерелами для розселення були тварини з популяцій Харківської та Луганської областей (Токарський та ін., 2019). Хоча за даними, наведеними у роботі В.А.Токарського та співавторів (2006), за період з 1986 по 2004 рр. було переселено майже 11 тис. особин на території 16 областей, якість переселення була далеко не ідеальною. Коли реінтродукція обмежувалася простим випуском тварин у нове місцеперебування, без проведення підготовчих дій з урахуванням екологічних потреб бабака, приживлюваність була дуже низькою, або повністю відсутньою (Токарський та ін., 2019).

Хоча далеко не всі спроби реакліматизації бабака були успішними, у деяких місцях він все ж закріпився. Наразі відомі низка поселень у різних районах Харківської області, у Краснопільському та Лебединському районах Сумської області, у різних районах Полтавської області (Токарський и др., 2006). У Диканському районі (зокрема у Диканському РЛП та Диканському мисливському господарстві) бабак створив стійкі колонії (Грубник та ін., 2020), які були джерелом тварин для подальшого розселення у Вінницькій та Одеській області. Нещодавно колонію бабаків виявили у Юр'ївському районі Дніпропетровської області (Пономаренко та ін., 2022), хоча раніше вважалося, що усі спроби реінтродукції у цю область не мали успіху (Токарський и др., 2006).

Ситуація із реакліматизацією на півдні України є різною. У Вінницькій області численні випуски не призвели до стабільних результатів, і на цей час

збереглися лише кілька сімей. У Миколаївській області в 2013 р. виявили досить числену колонію у Врадіївському р-ні, яка перебуває у задовільному стані все протягом двох десятиріч (Rashevskaya, Semeniuk, 2015; Токарський та ін., 2019). В Одеській області бабаки були випущені в шести районах, найбільш життєздатними вважалися колонії у північно-східній частині області, зокрема у Любашівському районі. За оцінками В. Дацюка [2019] в цих поселеннях було близько 1700 особин, але останнім часом популяція значно скоротилася через дозвіл на полювання та будівництво траси Одеса (Роженко, 2023). Програми з відновлення бабаків у природних умовах, що реалізуються в Буджацьких степах, демонструють успішні результати (Ronkin et al, 2020).

Підсумовуючи слід зазначити, що сподівання щодо відновлення популяції степового бабака в межах колишнього ареалу є досить реалістичними при дотриманні екологічних вимог умов існування цього виду й за умови дотримання основних принципів технології реінтродукції та контролю з боку науковців (Грубник та ін. 2019). Для підвищення ймовірності успішного приживлення бабаків в нових умовах важливо використовувати моделі місцепомешкань (Seddon et al, 2007).

1.4 Огляд існуючих методів дослідження популяцій бабаків

Популяційні дослідження, зокрема дослідження динаміки чисельності популяцій тварин, є одним з найважливіших завдань сучасної екології. Традиційно більшість досліджень з оцінки чисельності та динаміки популяцій ґрунтуються на польових методах (Elphick, 2008).

Загальноживаними методами обліку чисельності є методи маршрутного обліку, що полягають в підрахунку тварин шляхом спостереження на маршрутах або стаціонарних ділянках. У порівнянні з

іншими методами одержання вибірок вони досить прості в організації й проведенні, надають можливість обстеження великих територій та одержати великий обсяг облікової інформації. Окрім візуального виявлення деяких тварин їх можна також виявляти на слух, а вивчати тварин за слідами життєдіяльності, зокрема виявляти нори бабаків. Завдяки сучасним GPS-технологіям ці нори можна точно локалізувати, визначати межі колоній і візуалізувати дані за допомогою спеціалізованих програм, як-от OziExplorer або ArcGIS, що полегшує аналіз отриманих результатів. Ці програми дозволяють створювати карти поселень, на які нанесені основні та другорядні нори, а також оцінювати чисельність тварин у колоніях.

Для оцінки чисельності невеликих груп тварин, зокрема неподалік стаціонарних пунктів спостереження, можна застосовувати прямий підрахунок, який можна виконувати за методом “подвійного спостерігача” (Corlatti et al., 2017). Цей підхід, хоча і ефективний, залежить від використання оптичних засобів та має певні просторові обмеження. Ці обмеження може подолати таким сучасним застосунком як дроніи, які обладнані камерами, що дозволяють фото- та відеозйомку, та можуть досліджувати важкодоступні місця (Hoang et al., 2024; Brusentsova, Vasyliuk, 2024). Безпосереднє спостереження часто використовується для вивчення поведінки тварин на родинних ділянках чи в місцях їхніх контактів (Савченко, 2002). Для таких досліджень необхідне індивідуальне мічення тварин, і хоча бабаків можна розрізняти за індивідуальними особливостями депігментації лап, спостереження за багатьма тваринами потребує їхнього відлову та застосування кольорових міток, що розміщують на вухах (Савченко, Ронкін, 2008). Для вивчення переміщення тварин застосовують радіостеження; при цьому тварині хірургічним шляхом імплантують передавач, а для її виявлення застосовують антени та спеціальний приймач. Наприклад, за допомогою цього

методу визначили, що альпійські бабаки можуть розселятися на відстань понад 10 км (Stephens, 2002).

У важкодоступних місцях, де неможливо розробити стандартні маршрути для обліку, зокрема у горах, для популяційних досліджень застосовують метод відлову-мічення і повторного відлову або повторного спостереження (Corlatti et al., 2017). Бабаків відловлюють за допомогою спеціальних пасток з їжею, обмірюють, зважують й наносять індивідуальну мітку. У більшості випадків одночасно застосовують введення під шкіру мікрочипа-транспондера з номером (для його зчитування потрібно знову відловлювати тварину), а також розміщення на вусі металевої кліпси з номером, або кольорової мітки (такі мітки дозволяють обліковувати тварин не відловлюючи їх) (Carrier et al., 2022). Відлов тварин також застосовують для реакліматизації бабаків у інших районах, під час відлову є доцільним відбирати зразки для генетичних досліджень, епідеміологічних досліджень тощо.

До числа польових методів, які застосовують для досліджень екологічних вподобань бабаків, належить метод пробних площадок, що дозволяє оцінити видовий склад та щільність популяцій рослин, які є кормовою базою для бабаків (Ронкін, 2003).

1.5 Сучасні методи дослідження

Сучасний розвиток технологій значно полегшив роботу польових дослідників тварин, дозволивши отримувати набагато більше різноманітної інформації, одночасно витрачаючи набагато менше зусиль. У цьому розділі будуть згадані деякі рішення, але, слід розуміти, що цей перелік не претендує на повноту.

Останнім часом значного поширення для досліджень хребетних тварин, зокрема ссавців і птахів, набуло застосування фотопасток. Фотопастка являє собою камеру з можливістю фото- і відеозапису, яка має спеціальні датчики, які вловлюють рух чи зміну температури, і саме вони вмикають камеру у потрібний момент. Цей прилад дозволяє вивчати види, що активні вночі, рідкісні та потаємні види, вивчати добову та сезону активність тварин, краще розуміти вимоги тварин до середовища існування. Фотопастки застосовують не лише для фауністичних досліджень, але й для популяційних, зокрема визначення чисельності популяції (Corlatti L. et al., 2017; Forti et al., 2022).

Окрім фотопасток існують й інші типи приладів, що здійснюють автоматичне відслідковування. До таких належить автономний зовнішній прилад (логер), що автоматично реєструє різноманітні показники. Зазвичай такі логери використовують для фіксування показників довкілля, як то температура, вологість, тиск, освітленість тощо. У дослідженні каліфорнійського ховраха (Smith et al., 2018) логер під'єднали до кільцевої антени, що оточувала вхід у нору та зчитувала мікрочипи-транспондери, якими були помічені тварини. Цей досить дешевий метод дозволяє вивчати соціальну структуру родини як на поверхні, так і всередині нір.

Крім космічних знімків, для оцінки поселень бабаків також можуть використовуватися прилади дистанційного моніторингу, такі як акустичні детектори. Ці пристрої здатні реєструвати звуки, які видають бабаки під час спілкування або сигналізації про небезпеку (Collier et al, 2010). Аналіз таких звуків може дати уявлення про чисельність особин у певній території та їхню соціальну структуру (Kidney et al, 2016). Взагалі цей метод активно застосовується при дослідженні птахів, але він має потенціал і для дослідження бабаків (Collier et al, 2010).

Генетичні дані є зручним інструментом для екологічних досліджень, оскільки вони дозволяють отримати детальну інформацію про стан популяцій - в тому числі і таких тварин, як бабаки (Nicholas et al., 2018; Ma et al., 2024). Аналіз генетичної різноманітності та структури популяцій допомагає виявити рівень їхньої генетичної стабільності. Генетичні дані можуть вказувати на еволюційну історію виду, історію ізоляції та міграції, що може бути важливим для розробки стратегій збереження. Генетичні дані можуть також вказувати на вплив факторів середовища на генетичну різноманітність, що є ключовим для управління охорони біорізноманіття (De Kort et al, 2021).

Важливою допомогою у роботі вчених безумовно є громадянська наука (citizen science). Згідно з офіційним визначенням в Оксфордському словнику англійської мови - це «наукова робота, яка проводиться членами широкої громадськості, часто у співпраці з або під керівництвом професійних вчених та наукових установ». Історія громадянської науки налічує вже декілька століть, протягом яких її популярність то зростала, то згасала, але останнім часом з розвитком технологій та Інтернету ця галузь вийшла на небачений рівень. Нині громадянська наука переважно популярна у сферах біології, екології та охорони природи. Завдяки тисячам аматорів вчені можуть отримувати величезну кількість даних, не проводячи виснажливих і вартісних польових досліджень. Існують певні перестороги щодо неточності або неправдивості даних, які надають науковці-аматори, але як і у будь-якій науковій діяльності ретельно розроблена методологія має запобігати великим помилкам. Найбільш популярним інтернет-ресурсом для громадянської науки є iNaturalist — соціальна мережа натуралістів, громадянських вчених та біологів, побудована на концепції картування і обміну спостереженнями біорізноманіття по всьому світу. Вчені можуть використовувати для власних

досліджень підтверджені дані з цієї мережі, інших баз даних або зібрані за допомогою аматорів, які залучені у певне дослідження (Viviano, Mori, 2021).

1.6 Використання матеріалів космічного зондування для оцінки чисельності норних тварин

Оцінка стану популяцій бабаків, особливо в умовах, коли доступ до їхніх колоній ускладнений через бойові дії, потребує використання інноваційних методів. Одним із таких підходів є аналіз космічних знімків, який дозволяє вивчати зміни в середовищі існування бабаків без безпосередньої присутності дослідника на місці. Космічні знімки надають можливість дослідникам спостерігати за територіями, де мешкають бабаки і оцінювати стан їхнього середовища. За допомогою супутникових технологій можна отримувати детальну інформацію про ландшафт, включаючи типи рослинності, наявність водних ресурсів та зміни в землекористуванні. Цей метод особливо корисний у ситуаціях, коли традиційні методи, такі як прямий підрахунок стають неможливими через ризики для життя дослідників або фізичні обмеження (Neumann et al, 2015).

Використання космічного зондування для оцінки чисельності норних тварин є важливим елементом сучасних екологічних досліджень, оскільки цей метод дозволяє отримувати цінну інформацію про динаміку популяцій у різних екосистемах та їхню взаємодію з навколишнім середовищем. Традиційні підходи є складними, трудомісткими та не завжди ефективними, особливо у важкодоступних місцях. У цьому контексті використання космічного зондування стає надзвичайно перспективним методом для моніторингу чисельності норних тварин (Koshkina et al, 2019) та стану їхнього середовища.

Космічне зондування базується на використанні супутникових знімків та даних, що дозволяють отримувати інформацію про стан довкілля та просторові зміни в ландшафті. Завдяки цьому можна відстежувати фактори, що впливають на популяції тварин, такі як вирубка лісів, зміна русел річок та процеси урбанізації. Супутники здатні охоплювати великі території, що дає змогу виявляти просторові зміни та динаміку ареалів проживання норних тварин. Застосування інфрачервоного спектра дозволяє детально оцінювати щільність і стан рослинності, яка є важливим ресурсом для норних тварин, забезпечуючи для них їжу та укриття. Цей підхід також дозволяє ідентифікувати місця, де середовище проживання зазнало значних змін. Дані дистанційного зондування можуть бути використані для аналізу просторових змін у популяціях тварин, оцінки впливу зовнішніх факторів і вивчення їхньої адаптації до нових умов (Neumann et al, 2015).

Однією з головних переваг космічного зондування є його здатність забезпечувати моніторинг великих територій у короткі строки, що є особливо корисним для видів із широкими ареалами (Han et al, 2021). Крім того, систематичний характер збору даних із супутників забезпечує можливість регулярного моніторингу та порівняння отриманих результатів за різні періоди часу.

Завдяки використанню космічного зондування ми можемо спостерігати динаміку змін середовищ життя протягом багатьох років, навіть коли іншу інформацію вже не можна отримати. Наприклад, дослідження, проведене за допомогою супутникових зображень, показало, що в районах, які з 1960-х років постійно використовуються для сільського господарства, значно зменшилася щільність нір норних тварин, наприклад бабаків (Munteanu et al., 2020).

Використання даних з супутникових знімків може суттєво допомогти виявити нові території, на які норні тварини, такі як бабаки, можуть переселятися (Larue et al, 2017). Це особливо важливо в умовах змін клімату та антропогенних факторів, які негативно впливають на їхнє існування (Parmesan et al., 2013). Моніторинг середовищ за допомогою супутникових технологій дозволяє краще розуміти, як зміни в ландшафті можуть вплинути на популяції норних видів (Common et al, 1994).

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

У даній роботі ми досліджували зміни у поселеннях бабаків на території Національного природного парку "Дворічанський" та поселеннях біля села Нестерівка Великобурлуцької громади Куп'янського району (РЛП Великобурлуцький степ), які знаходяться під спостереженням протягом декількох десятиків років (Токарський та ін., 2015).

2.1 Отримання даних для дослідження

Дослідження базувалося на даних, зібраних маршрутним методом науковими співробітниками національного природного парку Дворічанський В.І.Ронкіним та А.А.Атемасовим у польовому сезоні 2016 року та люб'язно наданих нам для використання. Було обстежено поселення бабаків вздовж р.Оскіл з фіксацією координат нір та сімейних ділянок за допомогою GPS-навігаторів. Дані зберігаються у форматі.csv.

Дані про розташування нір та чисельність бабаків за 2017 рік, зібрані маршрутним методом, нам були люб'язно надані для використання В.І.Ронкіним та Г.О.Савченко. Для цих ділянок ми використали растрові дані космічних знімків за 2019 та 2024 роки.

Щоб простежити динаміку поширення бабаків на НПП "Дворічанський", ми використали матеріали космічних знімків, отриманих з таких ресурсів, як Google Earth Pro і Bing Maps, тому що ці знімки є у вільному доступі та тому що їх характеристики є достатніми для проведення космічного аналізу (Lesiv et al, 2018). Щоб отримати їх з даних ресурсів, ми робили високоякісні скріншоти, які потім скопіювали у файли за допомогою растрового редактору (Clip Studio Pro). Таким чином ми отримали дані за 2018

і 2020 роки. Також ми проаналізували зображення за 2023 рік, яке ми отримали за допомогою програми ArcGIS Pro, як частину його пакету World Imagery.

2.2 Аналіз динаміки кількості нор бабаків

Растрові колажі за 2018 та 2020 рік ми імпортували у середовище програми ArcGIS Pro. Ці фотографії ми скоригували відносно їх географічних координат - це ми зробили за допомогою операції Georeference, і після чого ми розставили контрольні точки, щоб певні об'єкти, які впродовж 2018-2023 років не змінювали своє положення, були на однакових місцях.

Після того, як фотографії були рив'язані до координат, ми почали наносити точки, які відповідали розташуванню окремих нір, ідентифікованому за викидами ґрунту. Для цього ми створили новий features layer, на якому ми змогли ставити точки. Також у цьому етапі, ми конвертували дані з.csv файлу за 2016 рік у точки на мапі, за допомогою XY to points функції.

Аналізуючи зміни кількості точок на картах, ми порівнювали дані за зазначені роки і таким чином отримали динаміку кількості нір бабаків, видимих на супутникових знімках у 2016 - 2023 рр.

Щоб оцінити динаміку чисельності бабаків, спиралися на відомості про те, що бабаки живуть сім'ями і їх нори розподілені по території не випадково. Досліджувану територію поділяли на окремі угруповання і рахували не кількість окремих нір, а кількість родинних ділянок. Для цього ми експортували точки з ArcGIS до файлів.csv та вирішили провести кластеризацію за допомогою мови програмування R. Кластеризація дозволяє не лише виявити структуру в даних і дозволяє ефективно поділити їх на окремі групи (Clarke et al, 2016).

Для цього використовуючи функцію `dism()` пакету `geosphere` для того, щоб розрахувати дистанцію між точками у метрах, а після цього користуючись функцією `hclust()` ми зробили кластеризацію нор на досліджуваній території. Використовуючи функцію `cutree()` з параметром $h = 120$ - ми залишили кластери довжиною до 120 метрів (Ronkin et al, 2020; Савченко и др., 2008).

2.3 Аналіз ділянок степової рослинності

Крім того, ми провели аналіз динаміки рослинності на ділянках степу, на яких мешкають бабаки. Для цього використовували дані з супутника LandSat та бази даних, зокрема “MODIS Land Surface Temperature”, “MODIS Vegetation Indices dataset”, “SRTM Elevation dataset” і “E-OBS Precipitation dataset”, доступ до яких отримали через Google Earth Engine.

В якості району наших досліджень ми обрали степову частину Харківської області, на якій найбільш зосереджені бабаки. Растрові дані, за якими був розрахований NDVI, були отримані з вищеназваних баз даних, були нормалізовані для двох часових проміжків: для періоду з 1 квітня 2019 до 1 жовтня 2019 року і для періоду з 1 квітня 2024 до 1 жовтня 2024 року.

За цими даними ми змогли розрахувати кілька індексів, які використовували далі у моделях. Розрахунки проводилися за допомогою мови програмування R.

Ми розрахували:

Нормалізований диференційний вегетаційний індекс, як ключовий індекс для оцінки стану вегетації. Він розраховується за формулою 2.1:

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}, \quad (2.1)$$

де NIR - відображення в ближньому інфрачервоному діапазоні, а Red - відображення в червоному діапазоні (Xie et al, 2018).

NDVI дозволив нам визначити щільність та стан рослинності на досліджуваній території.

Також ми розраховували індекс умов вегетації (VCI). VCI також використовується для оцінки здоров'я рослинності, але він дає більш повні дані відносно динаміки стану рослинності.

Він розраховується за формулою (2.2):

$$VCI = \frac{(NDVI - NDVI_{min})}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})}, \quad (2.2.)$$

де $NDVI_{max}$ і $NDVI_{min}$ — мінімальні та максимальні значення NDVI за певний період (Jiao et al, 2016).

Після розрахунку індексів окремих типів рослинних умов, ми поділили досліджувану територію на три умовні категорії залежно від значень NDVI. Перша категорія — ділянки з низькими значеннями NDVI, друга категорія охоплює ділянки зі значеннями NDVI від 0.2 до 0.4, і третя категорія включає ділянки, значення NDVI яких перевищують 0.4 (Walz et al, 2021). Для візуалізації цих категорій ми використали програму ArcGIS Pro, застосовуючи растровий калькулятор для створення тематичних карт.

2.4 Побудова моделі географічного поширення бабака

Географічне поширення бабаків оцінювалось методом максимальної ентропії (Phillips et al., 2006). Для моделювання поширення бабака у межах Харківської області ми використовували дані про знахідки нір бабаків у природному парку "Дворічанський" за 2016 рік та растрові дані LandSat.

На основі цих точок та растрових даних була побудована модель у програмі MaxEnt (далі - Модель 1). Для початку процесу в полі "samples" було вказано шлях до файлу з локаціями нір бабаків. У полі "Environmental layers" був доданий шлях до папки, що містить растрові шари параметрів середовища.

Модель побудована методом бутстрепінгу з використанням 10 повторів. Також для оцінки точності моделі ми оцінювали 25% точок, обраних випадково за допомогою зміни значення у настройках програми.

Також після побудови Моделі 1 ми вирішили додатково оцінити поширення бабаків на території всієї України, тому крім даних з національного природного парку “Дворічанський” ми включили “science grade” дані з gbif про знахідки бабаків з підтвердженими координатами. Це ми зробили для того, щоб додати контрастність фону, тобто ділянок, де бабаків не знаходили, з місцями, де їх було знайдено.

Дані gbif були нормалізовані з урахуванням роздільної здатності баз даних, на яких будувалася модель, щоб уникнути множинних знахідок на одному пікселі. Нормалізацію ми виконали за допомогою мови програмування R, використовуючи функції з пакетів `library(terra)`, `library(sf)`, `library(spThin)` і `library(dplyr)`. Спочатку ми завантажили.csv файл зі знахідками та координатами, а потім застосували функцію `thin`, щоб зменшити кількість точок до однієї на 5 км.

Окрім нормалізації даних, ми також трансформували растрові дані, перетворюючи.tif файли на.ascіі файли за допомогою функції `writeRaster`.

Після підготовки даних ми використали програму `MaxEnt`, і побудували модель (далі - Модель 2), використовуючи метод бутстрепінгу, з 10ма повторами та аналізом 25% випадково обраних точок.

Крім цього, для оцінки взаємозв'язку між поширенням бабаків і станом рослинності, наклали дані знахідок бабаків на розраховані значення NDVI для ділянки, для якої ми проводили аналіз рослинності. Для того щоб визначити, на яких саме категоріях ділянок з різними значеннями NDVI переважно мешкають бабаки, ми отримали значення NDVI для кожної точки зі знахідкою

бабака у програмі ArcGIS Pro, за допомогою інструменту "Extract Values to Points".

2.5 Оцінка якості побудованих моделей

Оцінку якості моделей ми проводили за допомогою ROC-аналізу (Fawcett, 2004), у відповідності результатів нашої моделі до реальних знахідок. ROC криву за даними наших моделей автоматично побудувала програма MaxEnt. Якість моделі оцінюється за показником AUC (Area under curve). Цей показник може варіювати від 0 до 1.

3. РЕЗУЛЬТАТИ

3.1 Аналіз динаміки чисельності нор бабаків

У результаті проведеного дослідження стану популяцій бабаків на території Національного природного парку "Дворічанський" було отримано важливі дані щодо динаміки чисельності та розподілі бабаків. Аналіз показав зміни в кількості родинних ділянок бабаків протягом 2016 – 2020 років. Зокрема, після проведення кластеризації ми отримали значення кількості родинних ділянок бабаків (табл.3.1).

Таблиця 3.1 Кількість виокремлених родинних ділянок у поселеннях бабаків на території Національного природного парку "Дворічанський"

Рік дослідження	Кількість родинних ділянок
2016	69
2018	65
2020	46

Графічні зображення, представлені на рисунках 3.1–3.3 демонструють розподіл кластерів нір бабаків у національному природному парку Дворічанський, що дозволяє візуалізувати зміни в їх чисельності протягом досліджуваних років. Кожна точка на рисунках представляє зафіксовану нору, забарвлену відповідно до її приналежності до певної родинної ділянки.

Burrow Families Based on Clustering within 120 Meters(2016)

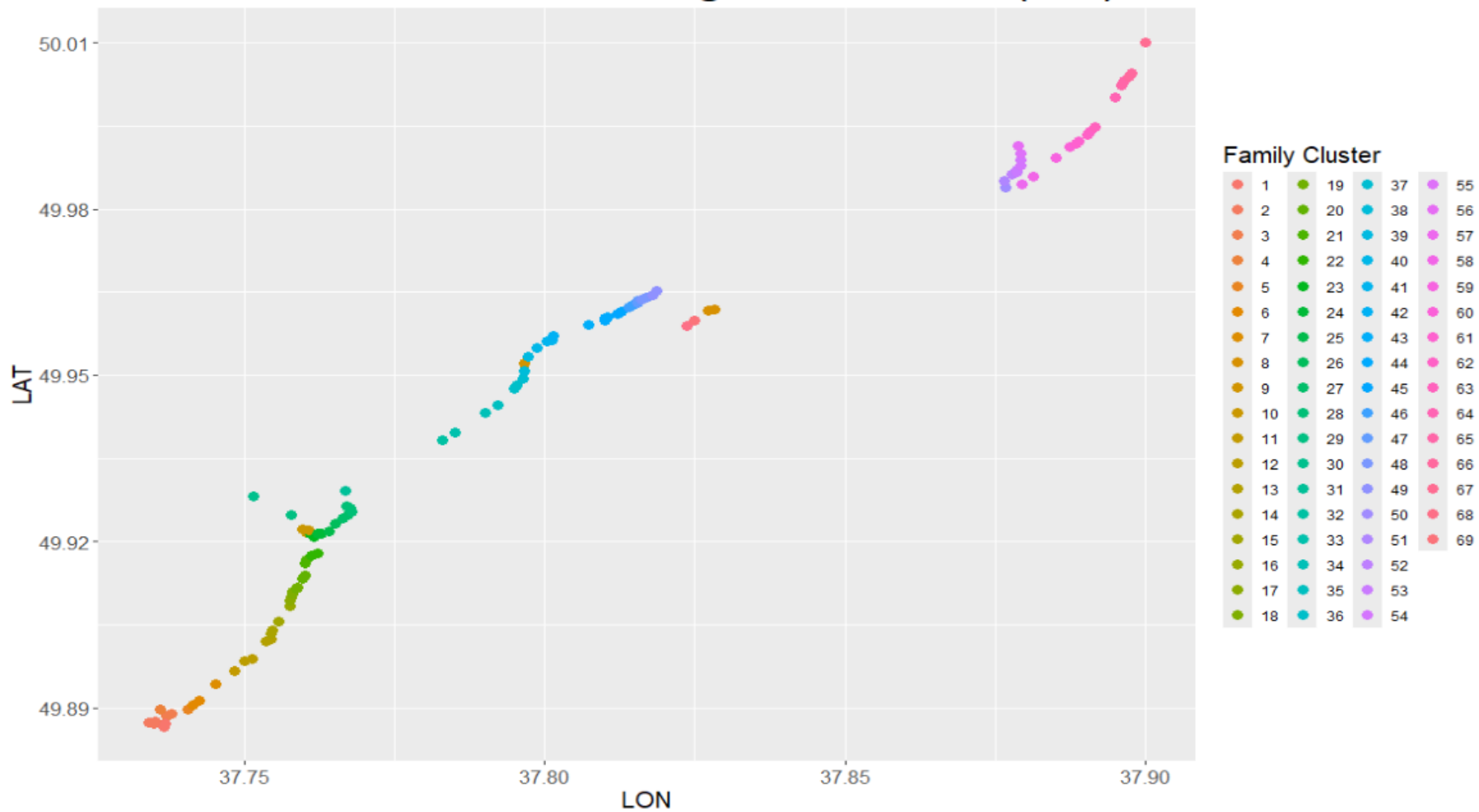


Рис.3.1 : Розподіл родинних ділянок бабаків на території Національного природного парку "Дворічанський" за 2016 рік.

Burrow Families Based on Clustering within 120 Meters(2018)

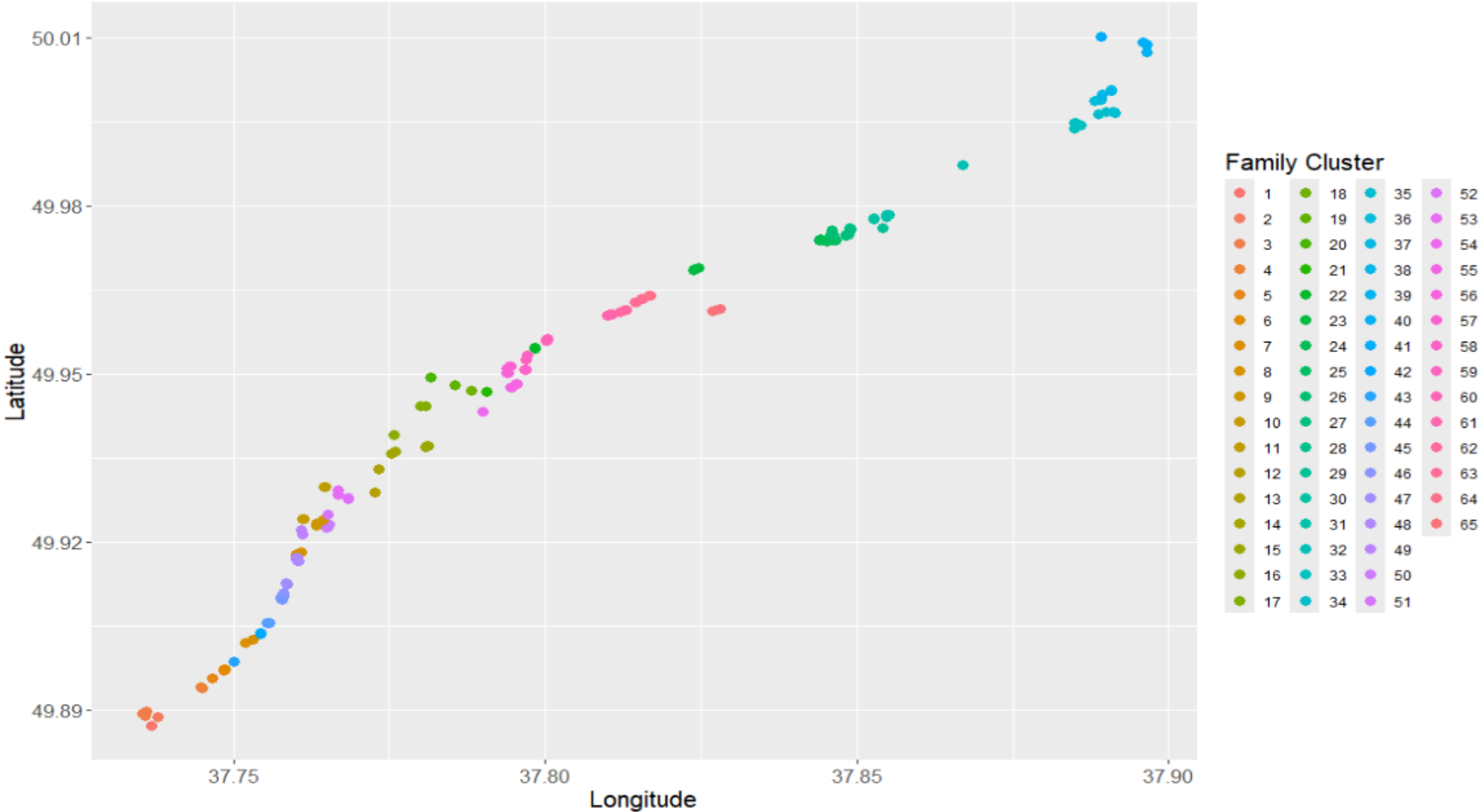


Рис.3.2 : Розподіл родинних ділянок бабаків на території Національного природного парку "Дворічанський" за 2018 рік.

Burrow Families Based on Clustering within 120 Meters(2020)

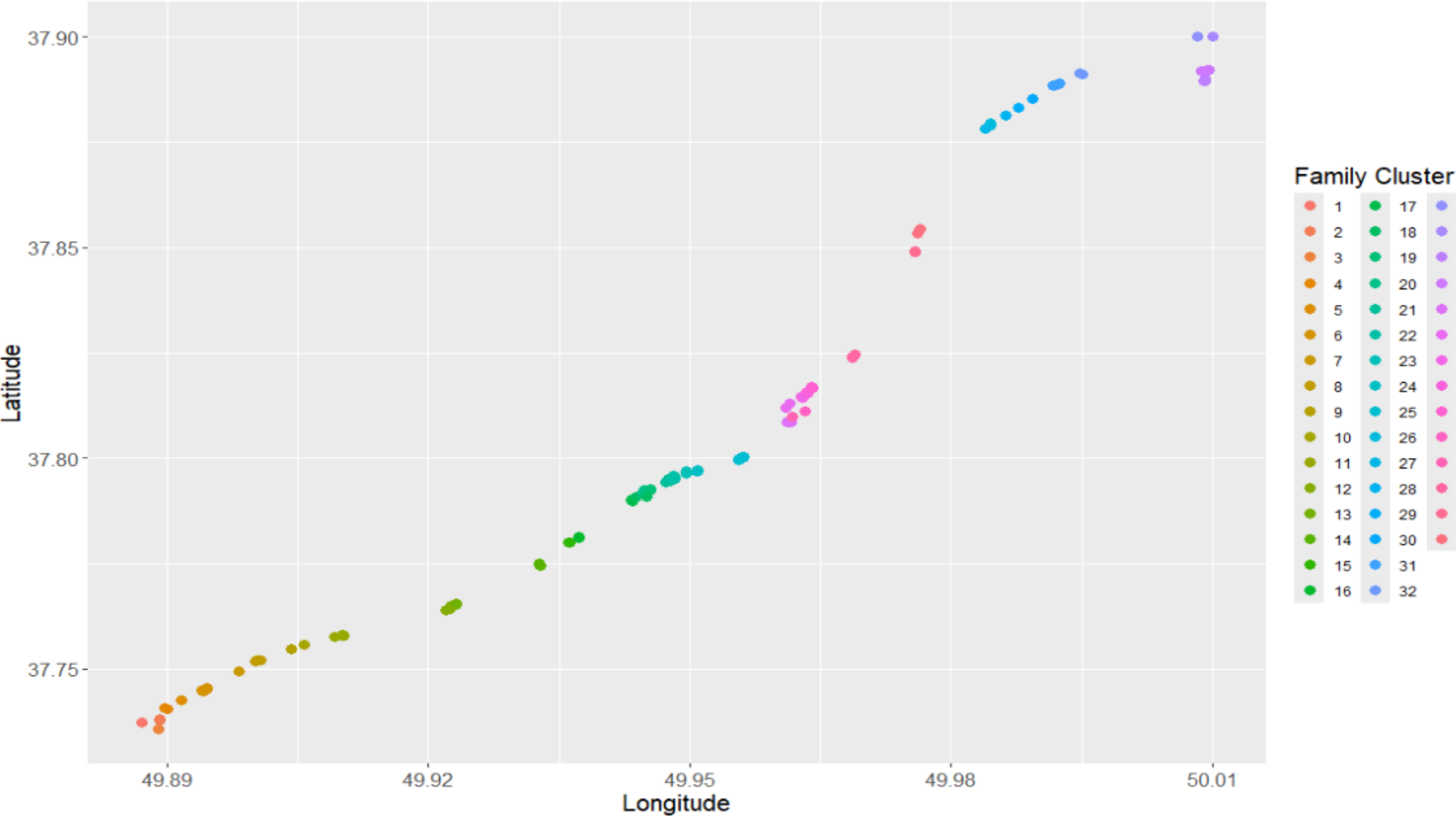


Рис.3.3 : Розподіл родинних ділянок бабаків на території Національного природного парку "Дворічанський" за 2020 рік.

Burrow Families Dynamic from 2016 to 2020

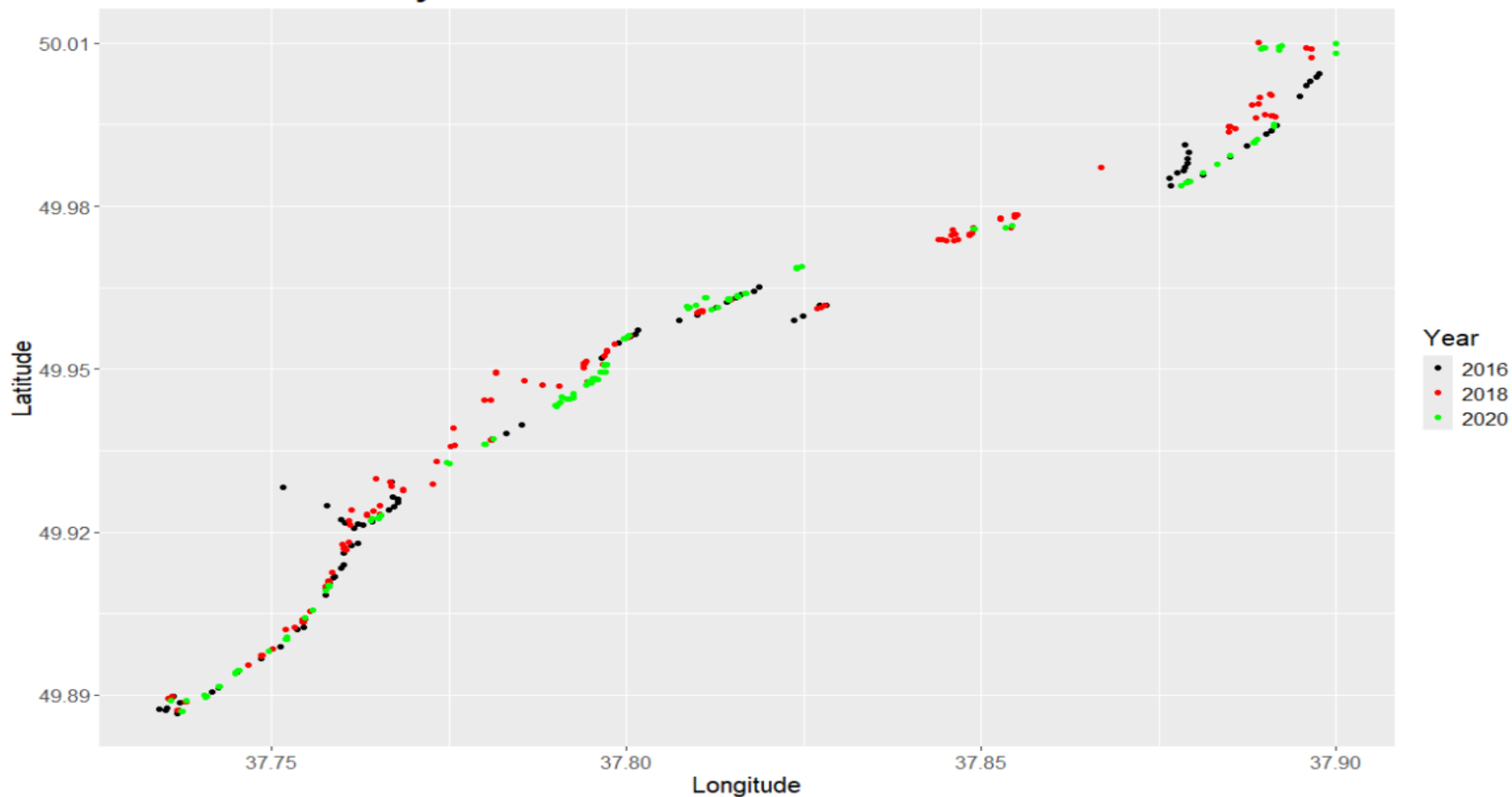


Рис.3.4 : Розподіл родинних ділянок бабаків у НПП Дворічанський за всі досліджувані роки. Точки забарвлені відносно того, у якому році було проведено їх спостереження.

Після проведення аналогічного дослідження стану популяцій бабаків на території РЛП Великобурлуцький степ (с.Нестерівка), було отримано важливі дані щодо динаміки чисельності та розподілу бабаків. Аналіз показав зміни в кількості родинних ділянок бабаків протягом 2016 - 2024 років. Зокрема, після проведення кластеризації ми отримали відомості про кількість родинних ділянок бабаків (табл.3.2):

Таблиця 3.2 Кількість виокремлених родинних ділянок у поселеннях бабаків на території РЛП Великобурлуцький степ (с.Нестерівка)

Рік дослідження	Кількість родинних ділянок
2017	26
2019	23
2024	21

Графічні зображення, представлені на рисунках 3.5–3.7 демонструють розподіл кластерів нір бабаків на території РЛП Великобурлуцький степ (с.Нестерівка), що дозволяє візуалізувати зміни в їх чисельності протягом досліджуваних років. Кожна точка на рисунках представляє зафіксовану нору, забарвлену відповідно до її приналежності до певної родинної ділянки.

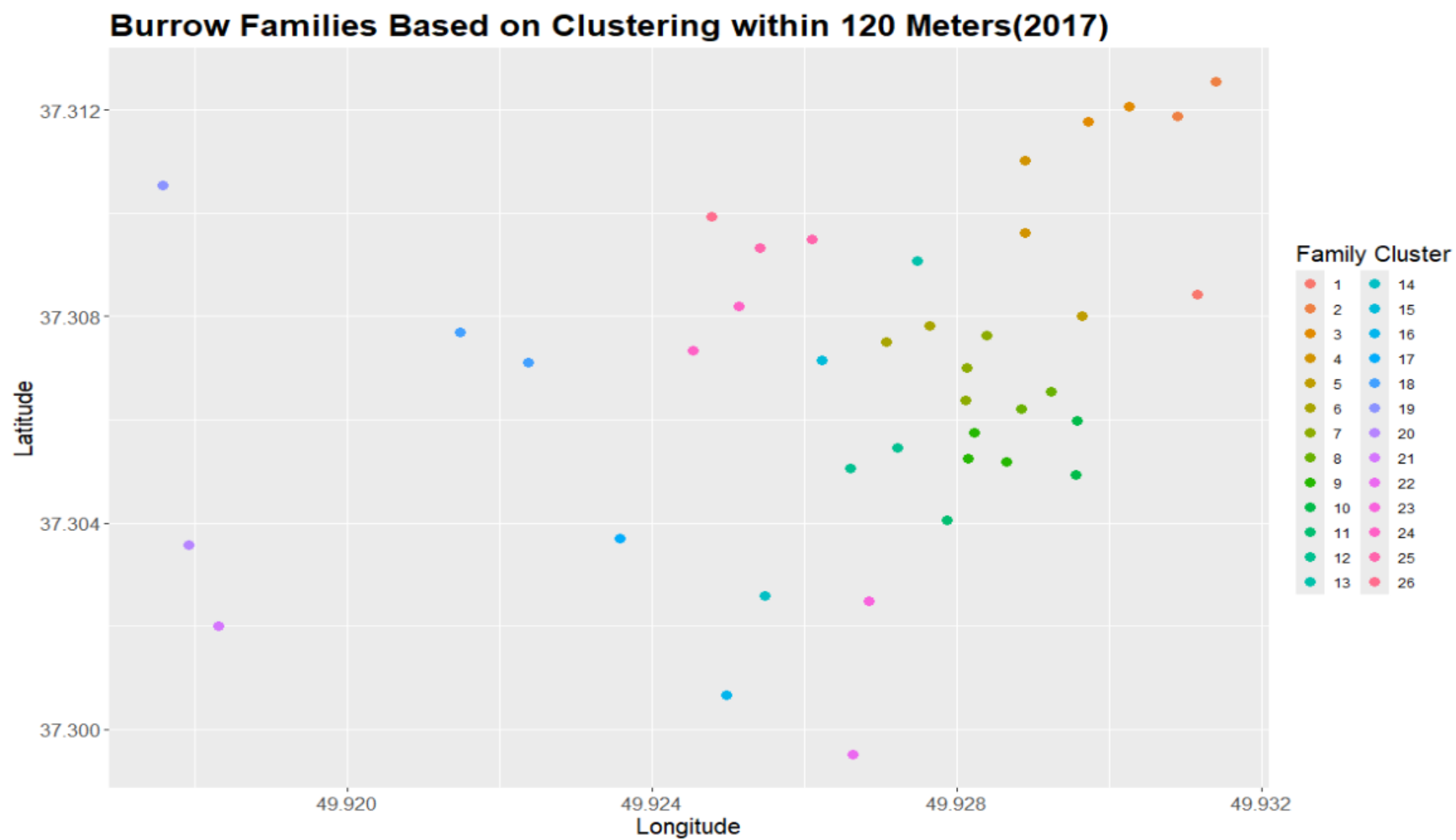


Рис.3.5 : Розподіл родинних ділянок бабаків на території РЛП Великобурлуцький степ (с.Нестерівка) за 2017 рік.

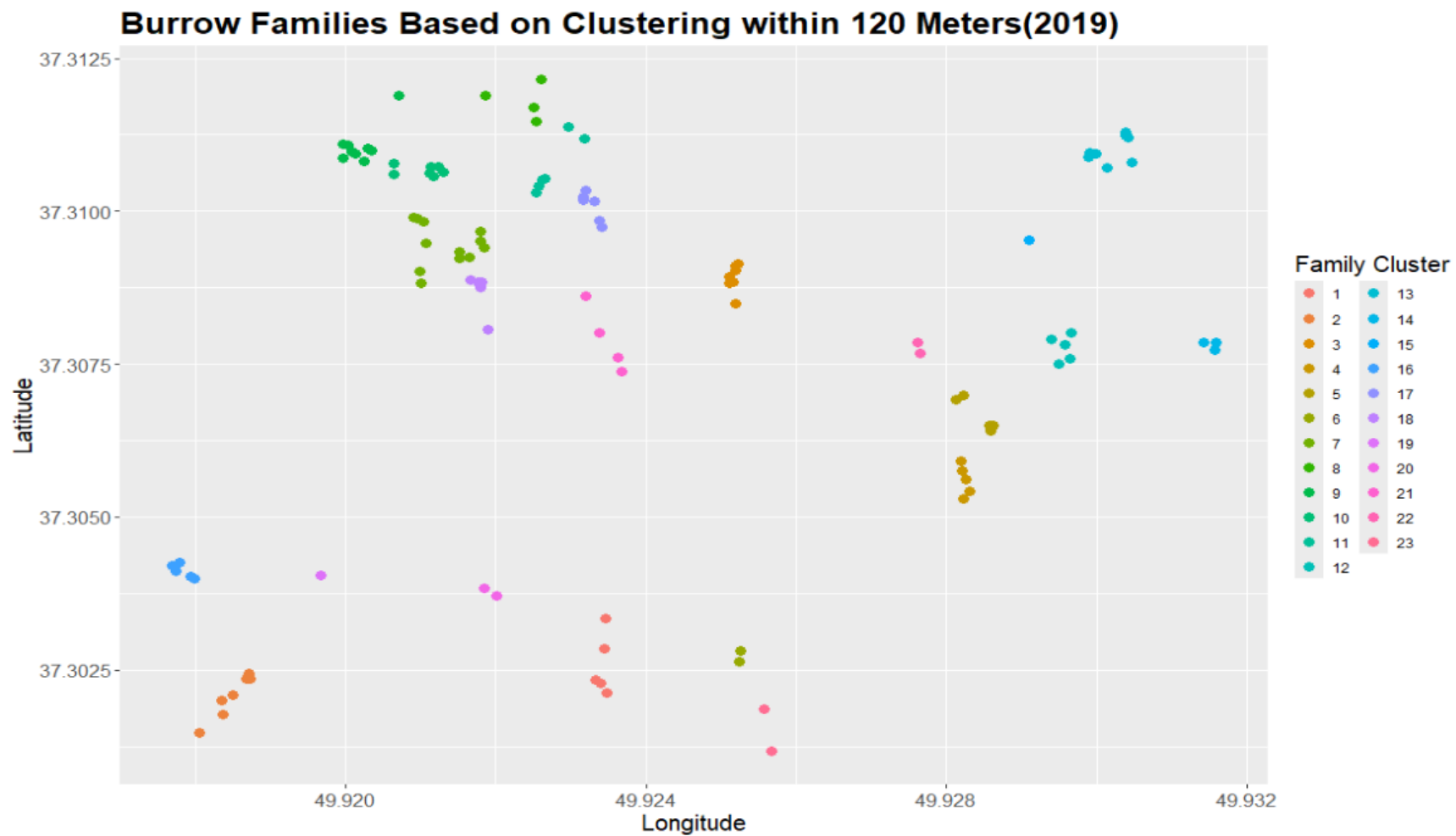


Рис.3.6 : Розподіл родинних ділянок бабаків на території РЛП Великобурлуцький степ (с.Нестерівка) за 2019 рік.

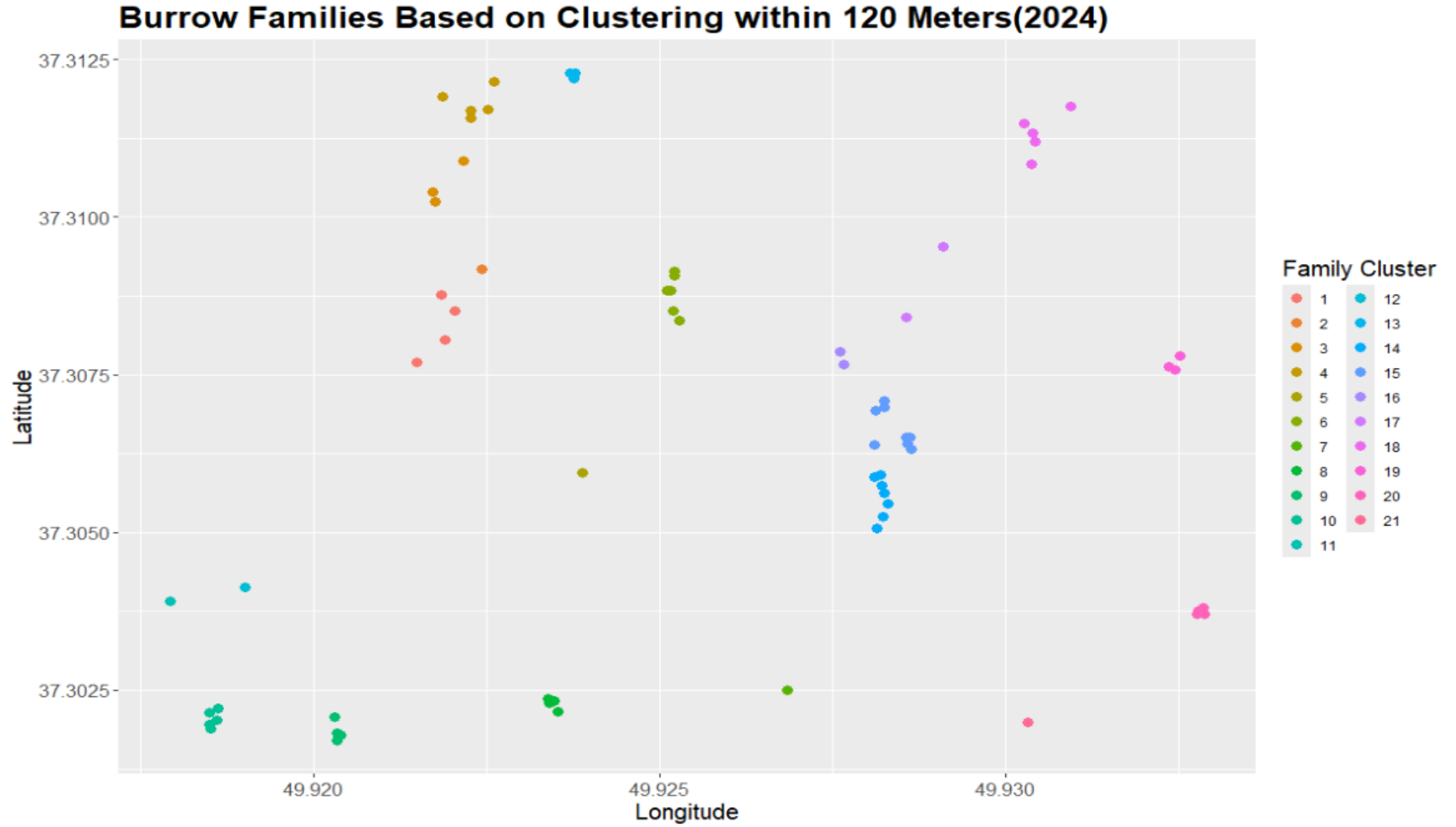


Рис.3.7 : Розподіл родинних ділянок бабаків на території РЛП Великобурлуцький степ (с.Нестерівка) за 2024 рік.

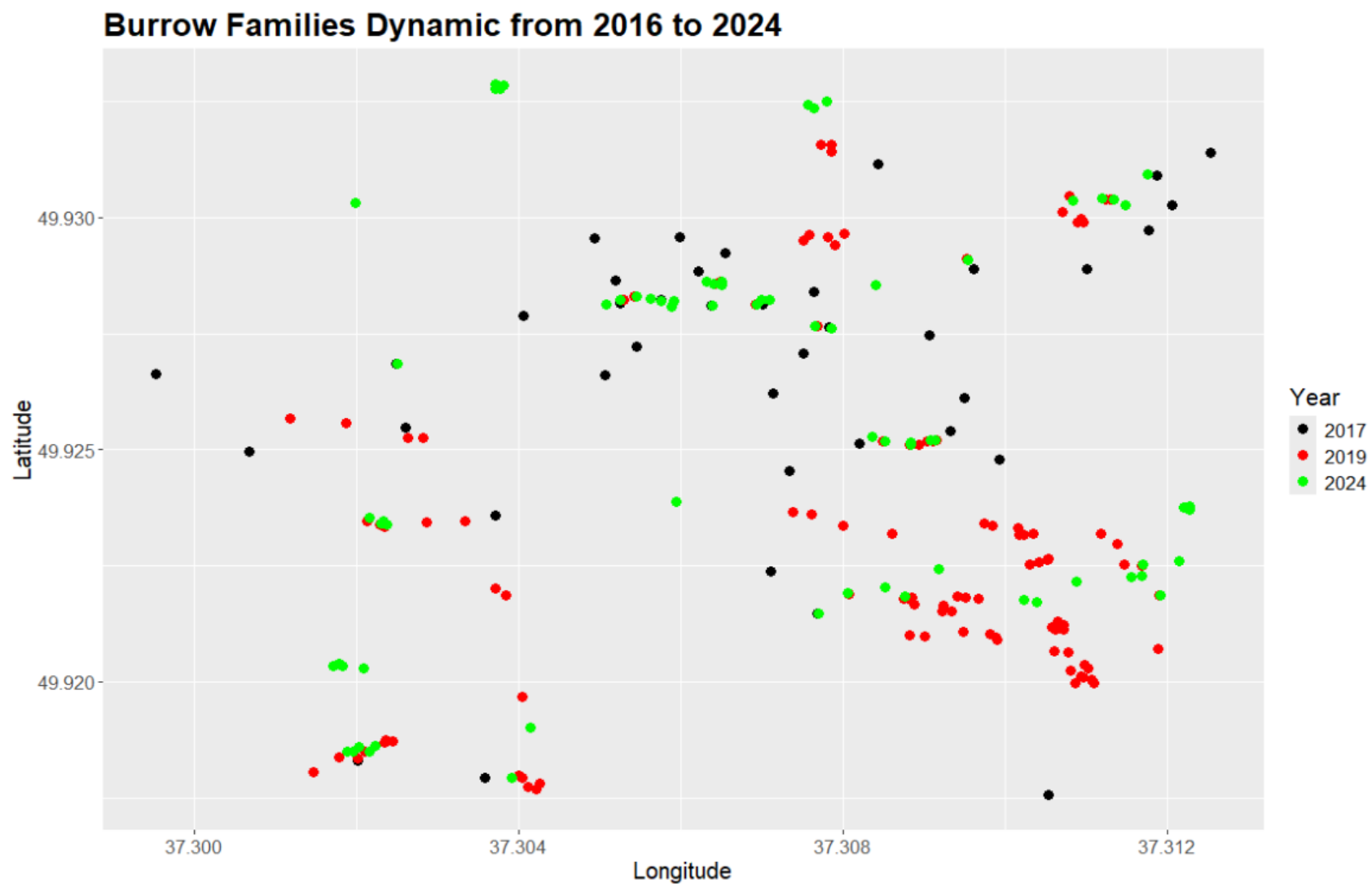


Рис.3.8 Розподіл родинних ділянок бабаків у РЛП Великобурлуцький степ (с.Нестерівка) за всі досліджувані роки. Точки забарвлені відносно того, у якому році було проведено їх спостереження.

3.2 Аналіз рослинності степових ділянок

Результати аналізу рослинності степових ділянок на основі нормалізованого диференційного вегетаційного індексу (NDVI) представлені на рисунку 3.9. На рисунку подано просторовий розподіл досліджуваних територій, поділених на три категорії залежно від значень NDVI. Червоним позначено розподіл бабаків.

На рисунку 3.10 представлено розподіл поселень бабаків залежно від значень NDVI.

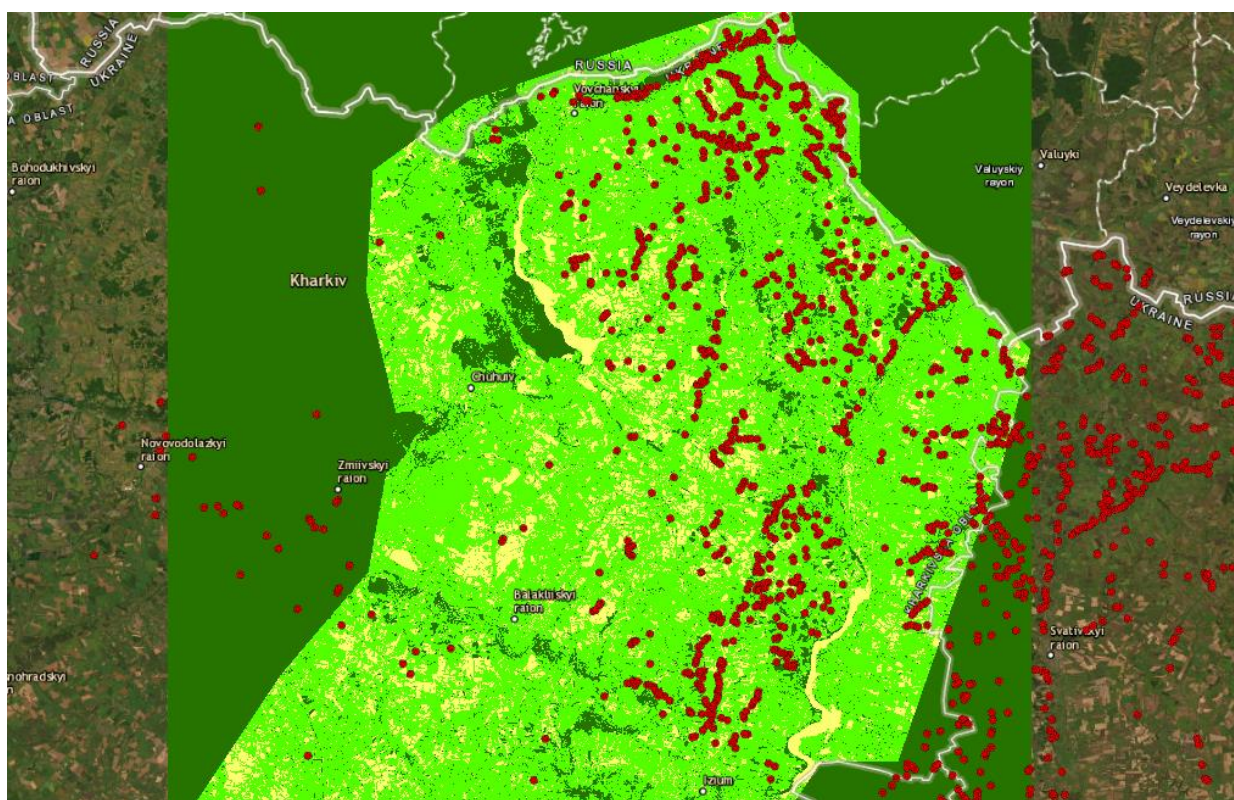


Рис. 3.9. Просторовий розподіл нормалізованого диференційного вегетаційного індексу (NDVI), поділений на категорії: ділянки з низьким NDVI (жовтий колір), NDVI від 0.2 до 0.4 (зелений колір) та NDVI понад 0.4 (темно-зелений колір).

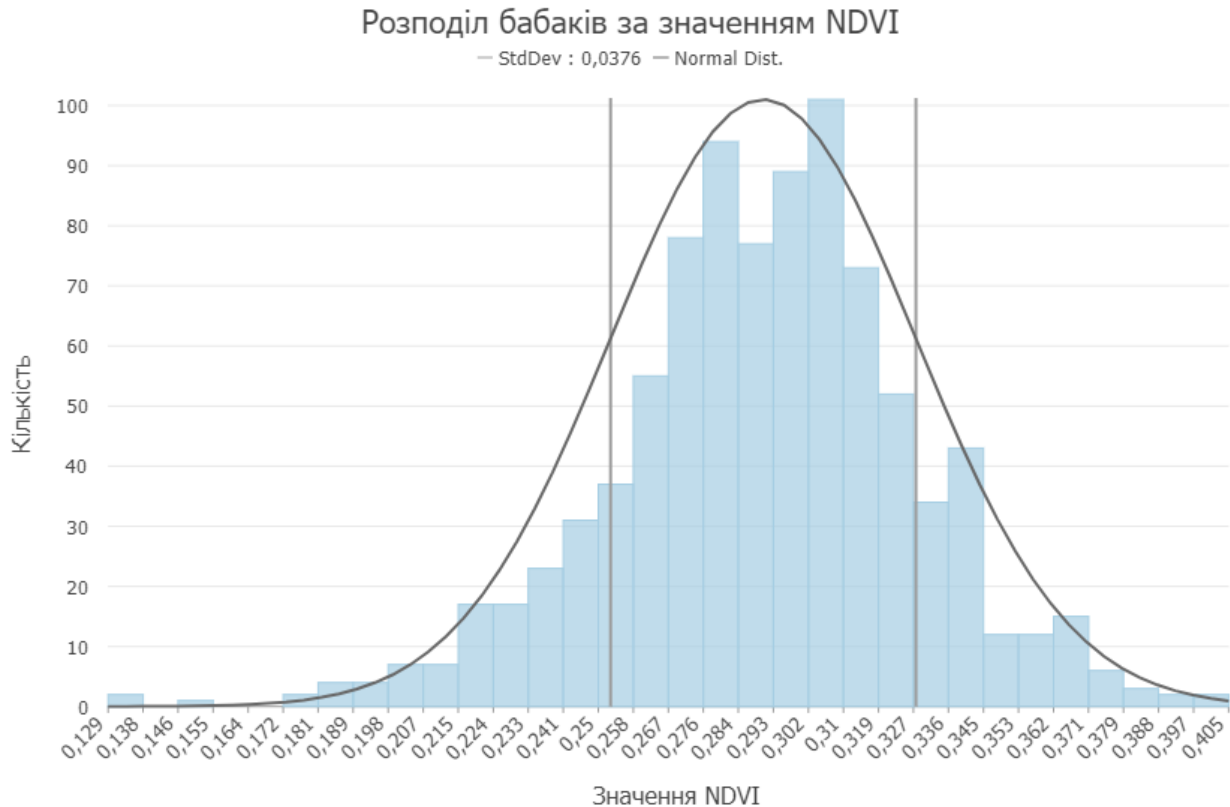


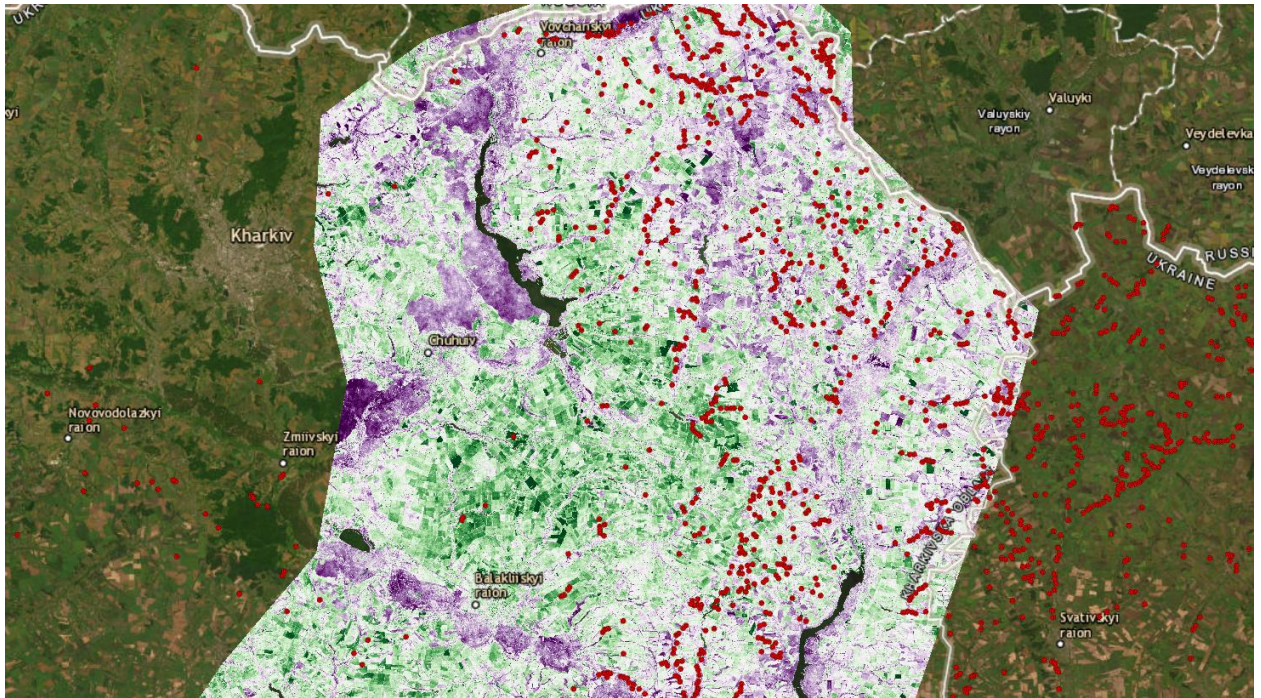
Рис. 3.10. Розподіл поселень бабаків залежно від значень нормалізованого диференційного вегетаційного індексу (NDVI).

Результати розрахунків нормалізованого диференційного вегетаційного індексу (NDVI) за період з 1 квітня по 1 жовтня 2019 року та з 1 квітня по 1 жовтня 2024 року представлені на рисунку 3.11. На рисунку візуалізовано просторовий розподіл щільності та стану рослинності на території дослідження. Зеленим кольором позначені ділянки, стан яких покращився, фіолетовим ділянки, стан яких погіршився у межах між 2019 та 2024.

На рисунку 3.12 відображено результати розрахунків індексу умов вегетації (VCI). Ділянки з різним рівнем стану рослинності представлені у

вигляді градацій кольорів. Використовується така сама кольорова градація, як і на рисунку 3.9.

Рис. 3.11. Просторовий розподіл нормалізованого диференційного вегетаційного індексу (NDVI) для степової частини Харківської області.



Червоним позначено місця проживання бабаків.

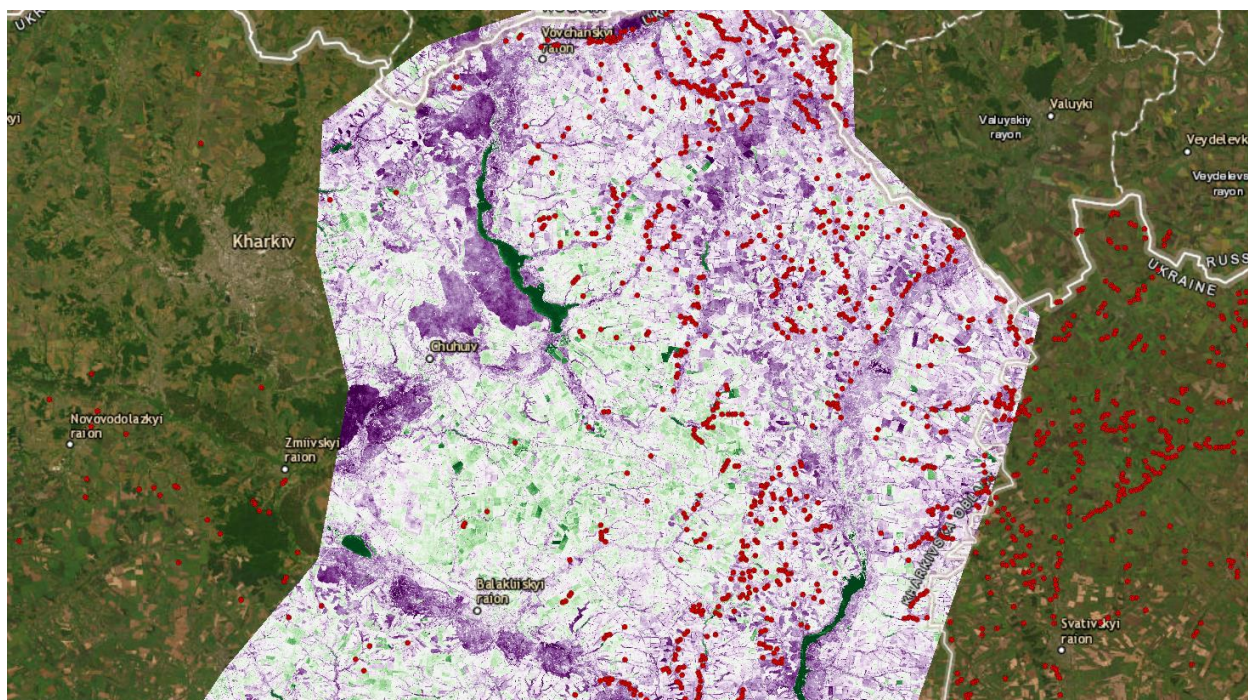


Рис. 3.12. Просторовий розподіл індексу умов вегетації (VCI) для степової частини Харківської області. Червоним позначено місця проживання бабаків.

3.3 Моделі розселення бабаків

Результати моделювання розселення бабаків, виконані за допомогою методу максимальної ентропії (MaxEnt), показали високий рівень точності.

Середнє значення AUC для Моделі 1, що охоплює територію Харківської області, становить 0.987 при стандартному відхиленні 0.001.

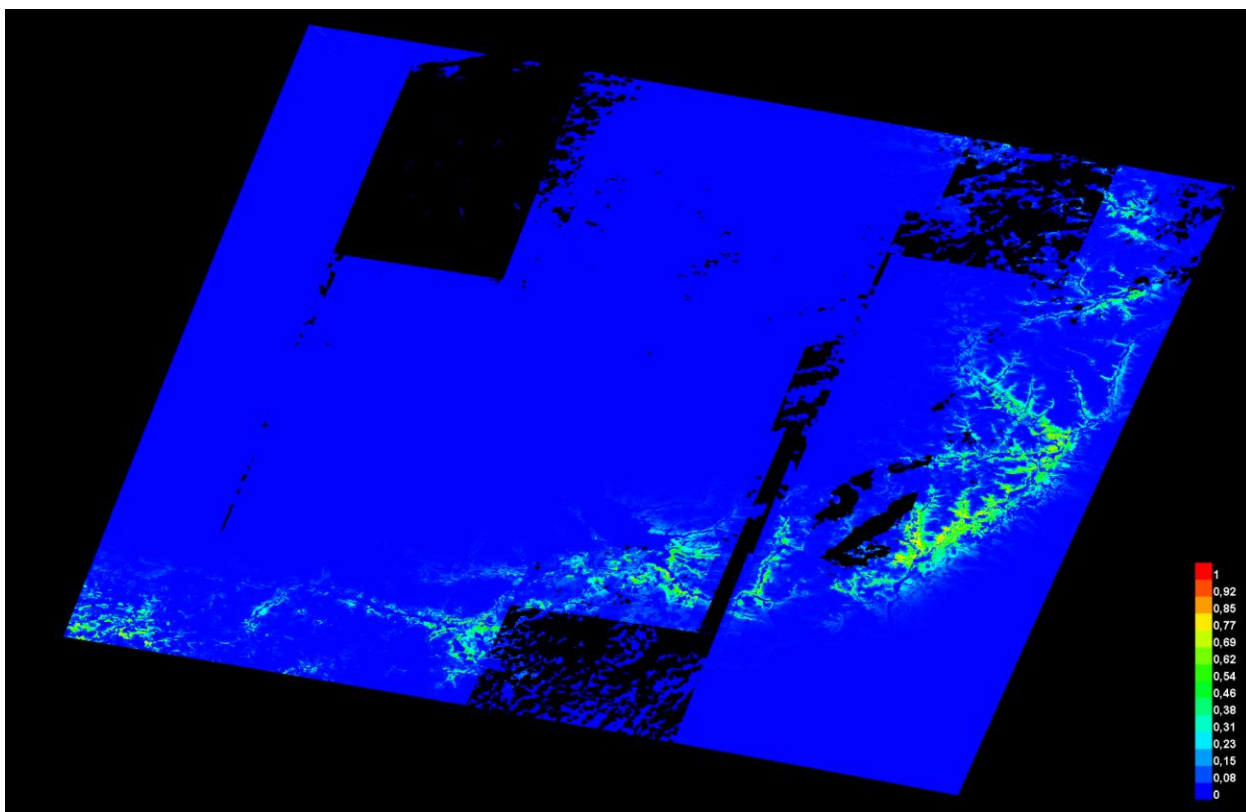


Рис.3.13 : Графічне зображення моделі розселення бабаків по території Харківської області (Модель 1)

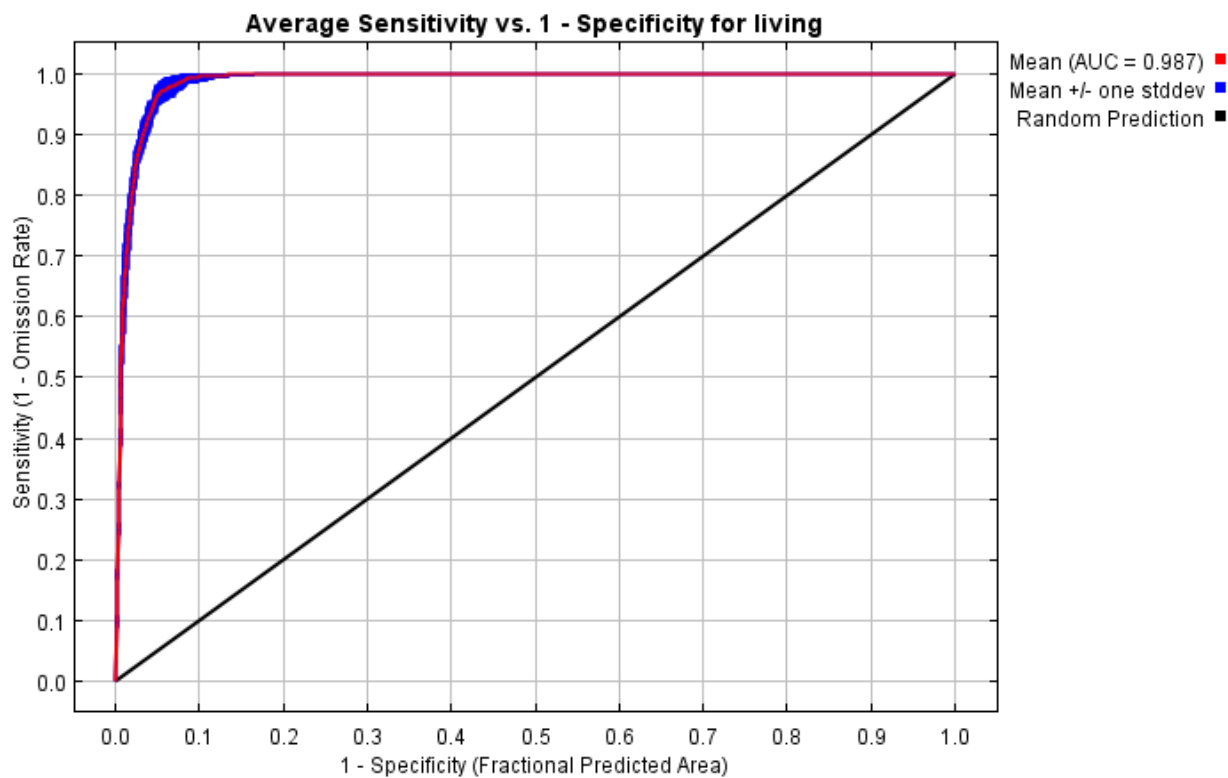


Рис. 3.14 : ROC-крива Моделі 1

Таблиця 3.3 Розподіл компонентів Моделі 1 та їх внеску

Змінна	Відсотковий внесок	Важливість
cdist2	46.5	60.4
urad2	27	21.8
trad2	19	13.9
emsd2	6.6	1.9
atran2	0.9	1.9

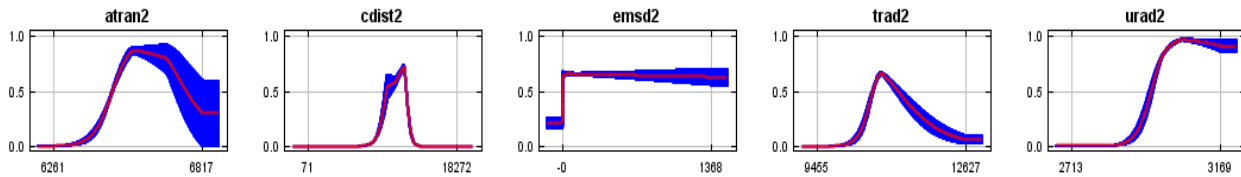


Рис. 3.15 : Криві впливу змінних середовища на прогнозування Моделі 1. Червоні лінії показують середню реакцію 10 повторних запусків моделі Maxent, а сині – середнє значення $\pm$ одне стандартне відхилення.

У Моделі 2, яка включає дані з усієї України, також були отримані позитивні результати. Для Моделі 2 значення AUC становило 0.886 при стандартному відхиленні 0.002.

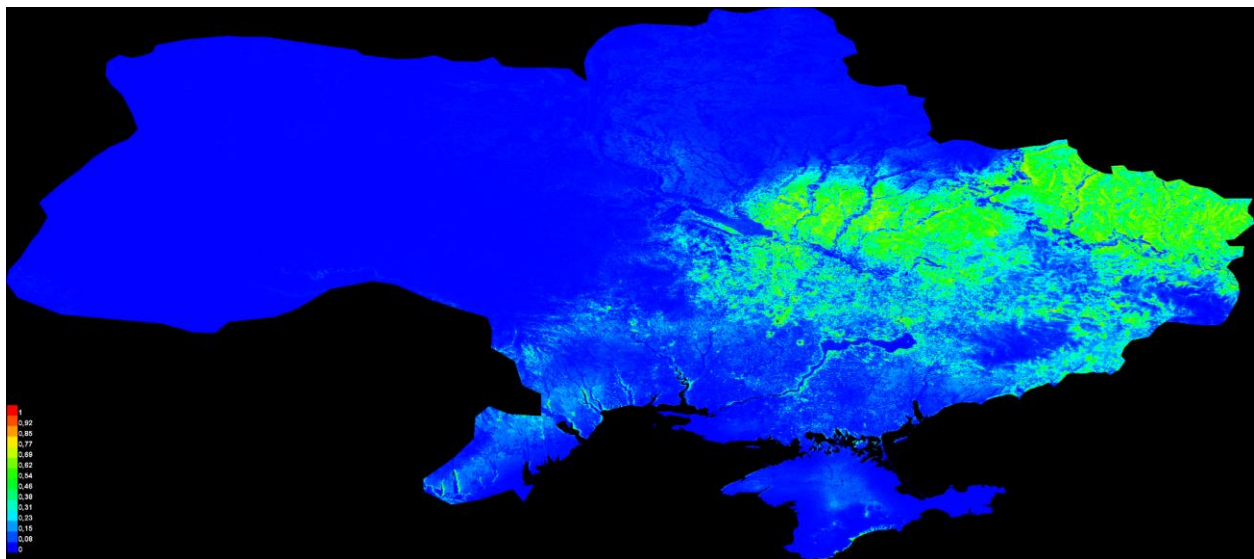


Рис. 3.16 : Графічне зображення моделі розселення бабаків по всій території України (Модель 2)

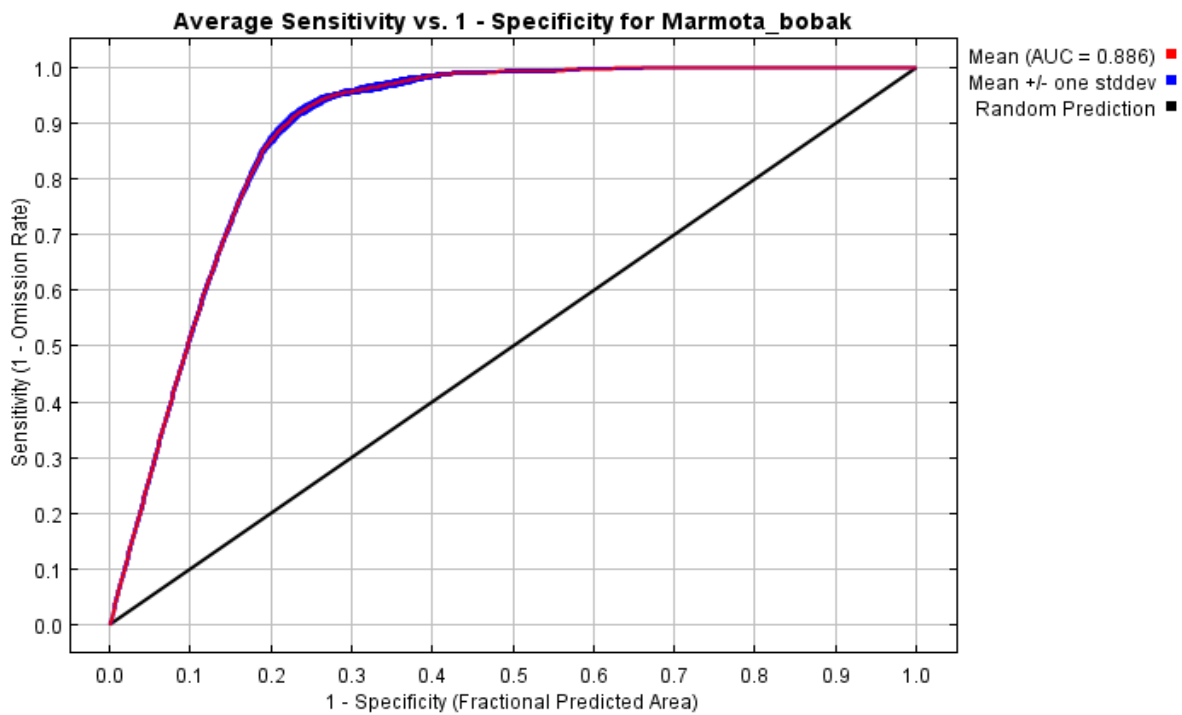


Рис.3.17 : ROC-крива Моделі 2

Таблиця 3.4: Розподіл компонентів Моделі 2 та їх внеску

Змінна	Відсотковий внесок	Важливість
Modis_Ndvi_Bobak	40.2	21.6
E_Obs_Precipitation_Bobak	35.8	53.4
MODIS_Land_Surface_Tem perature_Bobak	18.6	16.4
Srtm_Elevation_Bobak	5.5	8.6

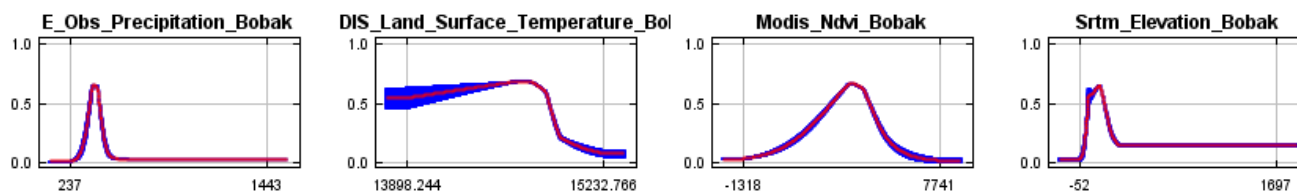


Рис. 3.18 : Криві впливу змінних середовища на прогнозування Моделі
2. Червоні лінії показують середню реакцію 10 повторних запусків моделі
Maxent, а сині – середнє значення $\pm$ одне стандартне відхилення.

4. ОБГОВОРЕННЯ

4.1 Тренди зміни кількості сімейних ділянок бабаків

Отримані результати дослідження поселень бабаків на території Національного природного парку "Дворічанський" свідчать про значні зміни у їх чисельності та розподілі. Динаміка кількості нір, проаналізована за допомогою кластеризації, показала, що поселення бабаків з часом зазнали зменшення чисельності. Кількість видимих нор суттєво зменшилася між 2020 та 2022 роками. Також дані кластеризації вказують на зменшення видимих нор у популяції біля села Нестерівка, хоча зменшення кількості там не таке суттєве.

Наші результати співпадають з результатами інших дослідників, які вказують на зменшення чисельності бабака у останні роки. Це може бути пов'язано зі зменшенням випасу великої рогатої худоби, яка зазвичай з'їдає високу для бабака траву, створюючи оптимальні умови середовища. Також

останніми роками чисельність бабака може сильно скоротитися через бойові дії, що проходять безпосередньо близько до їх місць проживання та харчування. Потужні звукові хвилі створюють стресову ситуацію та останніми роками приросту популяції у бабаків не спостерігається.

4.2 Основні обмеження методу аналізу космічних знімків

Метод, який ми перевіряли у цій роботі, має свої недоліки. Важливо зазначити, що війна в Україні ускладнила оцінку стану місцепомешкань бабаків за допомогою космічного зондування, оскільки вибоїни від снарядів у полях часто виглядають ідентично до нір бабаків. Це ускладнює точність польових спостережень і потребує додаткових зусиль для диференціації між природними та штучними об'єктами (земляними викидами).

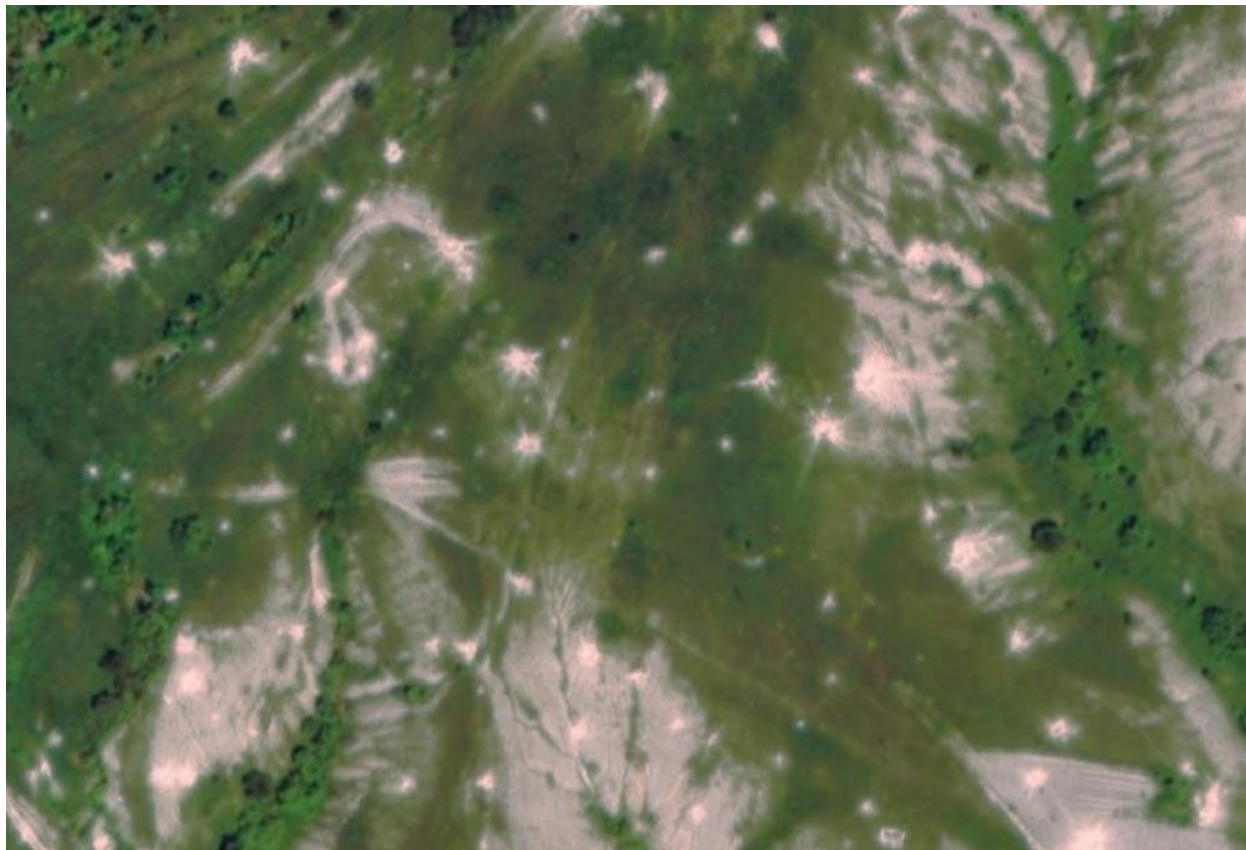


Рис. 4.1: Вибойни від снарядів на території біля села Кам'янка, схожі на нори бабаків.

Також можна зазначити, що дослідження нор бабаків із застосуванням космічних знімків може давати не повну картину, не показувати всі нори, які присутні на території. Також вадою цього методу є спосіб отримання космічних знімків та їх доступність: високоякісні космічні знімки, які продукуються такими компаніями як Махар або Airbus intelligence, коштують від кількох сотен або навіть тисяч доларів. Значний час було витрачено на пошук матеріалів.

Також можна зазначити, що не у всіх норах, які можна побачити з супутників, у певний момент часу проживають байбаки. Нори можуть бути старими і пустими. Навіть якщо нора не заселена протягом кількох років, вона

все ще може бути видимою на знімках, що призводить до завищення оцінок чисельності. Це підкреслює необхідність комбінування різних методів збору даних для отримання більш точної картини популяційного стану бабаків — використання космічних знімків і збір даних безпосередньо в полі.

4.3 Оцінка та динаміка основних типів рослинних умов

Аналіз розрахованих індексів вегетації показав значні відмінності у щільності та стані рослинності на території дослідження за останні 5 років, особливо на територіях, на яких проживають бабаки.

Розрахунок нормалізованого диференційного вегетаційного індексу (NDVI) за періоди з 1 квітня по 1 жовтня 2019 року та аналогічний період у 2024 році (рис. 3.9) дозволив визначити, що за останні 5 років велика кількість ділянок набула гіршого вегетаційного індексу, хоча важливо зазначити, що аналіз показав велику кількість ділянок, стан яких навпаки покращився.

Аналіз індексу умов вегетації (VCI) показав менш сприятливу ситуацію щодо стану рослинності на степових територіях Харківської області. Як видно з результатів (рис. 3.10), кількість ділянок із низькими значеннями VCI (позначених фіолетовим кольором) значно переважає над ділянками із високими значеннями. Це вказує на загальне погіршення стану рослинності за останні 5 років.

Важливо відзначити, що VCI є більш точним показником динаміки змін рослинності (Liu et al, 1996), оскільки враховує не лише поточний стан вегетації, як NDVI, але й її відносні коливання у межах обраного періоду.

4.4 Оцінка результатів моделювання розселення бабаків

Аналіз моделей розселення показав високу точність для Моделі 1, що охоплює Харківську область ($AUC = 0.987$) і для Моделі 2, що охоплює всю Україну ($AUC = 0.886$).

4.4.1 Оцінка моделі 1

Згідно з отриманими даними, найбільший відсотковий внесок у модель має змінна **cdist2** (корекція за косинусом кута падіння сонячного світла), яка становить 46.5%. Параметр cdist2 враховує вплив кута падіння сонячного світла на інтенсивність відбитого сигналу. У контексті моделювання розподілу бабаків це має значення, оскільки різні кути освітлення можуть впливати на визначення типу середовища проживання. Наприклад, схили, освітлені під різними кутами, можуть бути визначені як більш або менш придатні для життя бабаків, залежно від доступності тепла та рослинності.

Висока важливість цієї змінної (60.4%) вказує на те, що бабаки, ймовірно, обирають місця проживання, які забезпечують легкий доступ до води та рослинності (Allainé et al, 1994).

Наступним важливим фактором є **urad2**, який має відсотковий внесок 27% і важливість 21.8%. Параметр urad2 відображає випромінювання, що піднімається від земної поверхні до супутника. Він є важливим показником для оцінки теплових характеристик середовища.

Змінна **trad2**, який представляє собою температурну радіацію, має внесок 19% та важливість 13.9%. Це вказує на те, що температурні умови також мають значення для бабаків у Харківській області, ймовірно, впливаючи на їхню активність та сезонні зміни в поведінці.

Змінні **emsd2** і **atran2** (емісійність ґрунтів та коефіцієнт передачі через атмосферу) мають найменші внески — 6.6% і 0.9% відповідно, з важливістю 1.9% для обох. Ми вирішили додати їх, тому що на наш погляд ці фактори могли б впливати на зимівлю тварин, але виходить так, що ці фактори мають незначний вплив на розселення бабаків у цьому регіоні.

4.4.2 Оцінка моделі 2

Згідно з отриманими даними, найбільший відсотковий внесок у модель має змінна **Modis_Ndvi_Bobak**, яка становить 40.2%. Це свідчить про те, що наявність рослинності, оцінювана за показником NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), є критично важливою для бабаків, оскільки вона безпосередньо впливає на їхнє харчування та середовище існування.

Наступним важливим фактором є **E_Obs_Precipitation_Bobak**, який має відсотковий внесок 35.8% і найвищу значимість 53.4%. Це вказує на те, що кількість опадів суттєво впливає на розподіл бабаків, оскільки достатня вологість сприяє розвитку рослинності, яка є основою їхнього раціону.

Змінна **MODIS_Land_Surface_Temperature_Bobak** має внесок 18.6% та важливість 16.4%. Це свідчить про те, що температурні умови також грають роль у розселеннях байбаків, ймовірно, впливаючи на їхню активність та репродуктивний цикл.

Нарешті, змінна **Srtm_Elevation_Bobak** має найменший внесок — 5.5% з важливістю 8.6%. Ми додали її у модель, бо вважали, що зміна рельєфу буде впливати на наявність бабаків. За результатами моделі висота над рівнем моря не є критично важливим фактором для виду.

4.5 Визначення придатних для розселення бабаків ділянок

Модель 1 демонструє, що бабаки переважно розподіляються в районі річки Оскіл та в південно-східній частині Харківської області. Особливо помітна концентрація популяцій у Шевченківському районі, де вони утворюють компактно згруповані, що свідчить про сприятливі умови для їхнього існування. Модель 2 вказує на те, що бабаки можуть добре себе почувати не лише в Харківській та Луганській областях, але й на значних територіях центральної України. Потенційно придатні для їхнього проживання території охоплюють Полтавську, Чернігівську, Кіровоградську та Дніпровську області. Також варто зазначити, що південна частина Запорізької області та Одеська область є перспективними для розселення бабаків, що відкриває нові можливості для їхньої реінтродукції та збереження.

Моделювання у цій роботі було використано у першу чергу для оцінки параметрів середовища та їх вплив на розселення бабаків, хоча інформація, яку можна отримати з передбачень цих моделей не зупиняється лише оцінкою впливу середовища на бабаків. Ми вирішили перевірити, чи можуть моделі прогнозувати наявність бабаків на довільно обраній території.

Ми взяли довільно обрану частину мапи, утвореної Моделлю 2, яка показувала підходящі умови для бабаків і яка не пересікається з точками, на яких ми модель тренували. Ми обрали ділянку на північ від села Сергіївка, Херсонська область; ця ділянка знаходилася на березі Дніпра до Каховської екологічної катастрофи. Після того як ми знайшли цю ділянку на космічному знімку, доволі швидко ми змогли побачити місця з норами бабаків. Це показує, що модель дійсно має здатність прогнозувати розподіл бабаків.

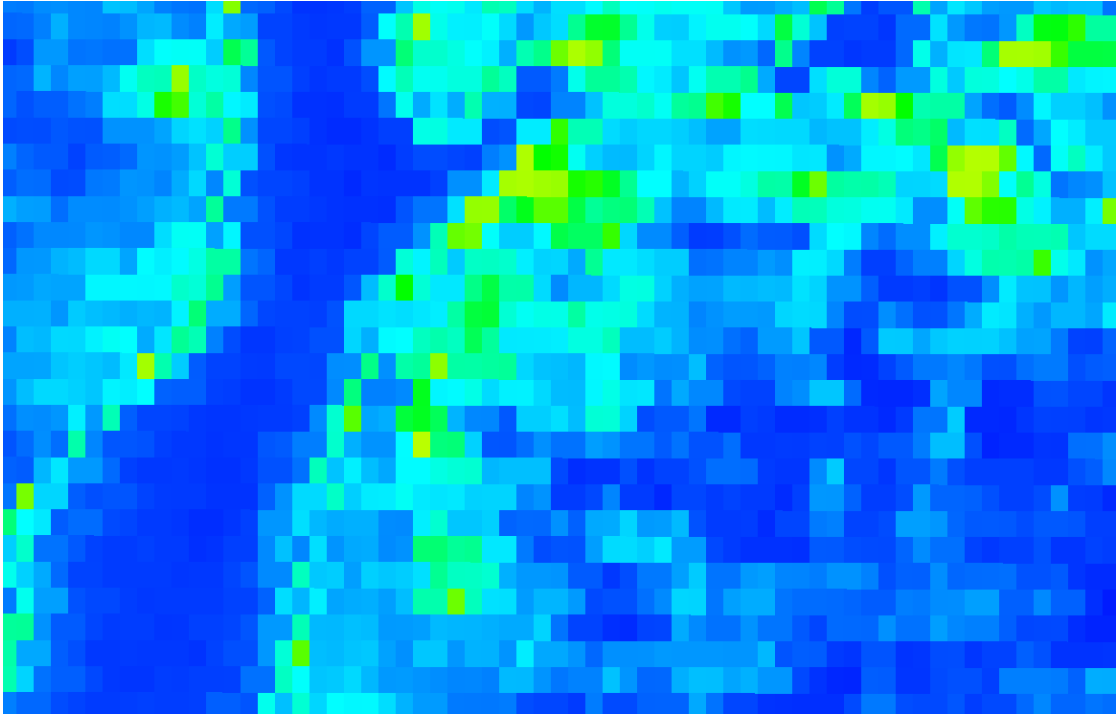


Рис. 4.2: Ділянка прогнозів Моделі 2, що показує потенційно придатні умови для *Marmota bobak*.



Рис. 4.3: Супутниковий знімок тієї ж ділянки, що демонструє її географічні особливості.



Рис. 4.4: Яр, видимий на Рис. 4.3, де чітко виділяється велика кількість нор бабаків.

Таку ж саму операцію ми провели ще кілька разів, дивлячись на "гарячі точки" Полтавської та Одеської областей, і прогнози моделі збувалися. Хоча треба зазначити, що в Одеській області нори бабаків прийшлося трошки пошукати, але це можна пояснити тим, що Одеська область не є природним ареалом бабаків, і там вони знаходяться у місцях інтродукції.

Потрібно зазначити, що моделі MaxEnt, які ми побудували, не мають обов'язково показувати на розселення бабаків на території Харківської області, або України. Через те, що бабаки погано розселяються, вони не будуть

присутніми на всіх територіях, на які вказують наші моделі, вони вказують на території, умови в яких є придатними для їх розселення.

Результати моделювання потребують подальшої верифікації з урахуванням вищезгаданих складнощів. В майбутньому важливо розглянути можливість інтеграції додаткових методів моніторингу, таких як використання дронів або наземних спостережень, щоб покращити точність оцінок популяцій та їх середовища існування.

ВИСНОВКИ

1. Основні параметри середовища у місцепомешканнях бабаків, які впливають на придатність території для їх проживання, визначені за даними космічного зондування, включають: кут падіння сонячного світла, випромінювання від земної поверхні, температурну радіацію, вегетаційний індекс, кількість опадів та температуру поверхні землі.

2. Найбільший внесок у вибір місцепомешкань бабаком вносять такі ключові фактори, як корекція за косинусом кута падіння сонячного світла (46.5%) і випромінювання від земної поверхні (27%) для Моделі 1, а також вегетаційний індекс (40.2%) та кількість опадів (35.8%) для Моделі 2.

3. Основні типи рослинних умов на досліджуваній території включають ділянки з високими, середніми та низькими значеннями вегетаційних індексів. На досліджуваній території переважають ділянки з середніми значеннями рослинних індексів. Також бабаки надають перевагу саме цим ділянкам для заселення. Динаміка ділянок за останні 5 років показала значні зміни: кількість ділянок, де стан рослинності погіршився, переважає, хоча спостерігалися й випадки покращення.

4. Ділянки, що за сукупністю ключових факторів є потенційно придатними для *Marmota bobak*, розташовані в північно-східній частині Харківської області, зокрема в районах біля річки Оскіл та у Шевченківському районі. В Україні результати моделювання вказують що придатні для бабаків території знаходяться на центральній, та південно східній частині країни. Співставлення з реальною картиною розповсюдження виду на модельній території показало, що ці території відповідають умовам існування бабаків.

ПОДЯКИ

Я хочу висловити щиру подяку всім, хто допоміг у реалізації цього дослідницького проекту:

- **Володимиру Ісааковичу Ронкіну, Андрію Анатолійовичу Атемасову та Галині Олексіївні Савченко** — за цінну інформацію про поширення бабаків на території Дворічанського національного природного парку та околицях Нестерівки Великобурлуцької громади Куп'янського району.
- **Прилуцькому Олегу Владиславовичу** — за професійні пояснення сучасних методів роботи з ГІС-системами та методів аналізу поширення тварин.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Брандлер О. В. Подготовка обоснования возможности реинтродукции колониальных роющих беличьих (степного сурка или крапчатого суслика) на территории Центрально-Черноземного биосферного заповедника или его охранной зоны (отчет о научно-исследовательской работе) - Москва: ИБР РАН. 2012. 53 с.
2. Грубник В. В., Токарський В. А. Реінтродукція степового бабака (*Marmota bobak* Mull. 1776 (Rodentia, Sciuridae)) на прикладі Диканського району Полтавської області. *Екологічні науки*. 2020. 1. (28) С. 38 DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.1-28.38>.
3. Дацюк В. Бабак степовий (*Marmota bobak*) на півночі Одеської області (Україна) *Theriologia Ukrainica*. 2019. 17. С. 92–96.
4. Зізда Ю. Прижиттєві методи дослідження екології тварин та їх значення у дослідженнях на прикладі *Sciurus vulgaris*. *Праці Теріологічної Школи*. 2010. 10. С. 115–127.
5. Пономаренко О., Ветров В., Трифанова М., Задорожна Г. Знахідки бабака степового у Дніпропетровській та Полтавській областях. *Novitates Theriologicae*. 2022. 13. С. 83–87
DOI: 10.53452/nt1334.
6. Про затвердження переліків видів тварин, що заносяться до Червоної книги України (тваринний світ), та видів тварин, що виключені з Червоної книги України (тваринний світ) - URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0260-21#Text> - 2021.
7. Роженко М. Бабак степовий (*Marmota bobak*) на Одещині: огляд поселень. *Novitates Theriologicae*. 2023.16: 115–118.

8. Ронкин В.И. Особенности питания степного сурка (*Marmota bobak* Müll.) на северо-востоке Украины - Автореф. дисс... канд. біол. наук: 03.00.08 - Зоология. Москва, 2003 - 24 с.

9. Ронкін В. І., Савченко Г. О., Атемасов А. А. Стан поселення, типи сімейних ділянок та перспективи збереження степового бабака у крейдяному ландшафті НПП «Дворічанський» *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна*. 2017. 29. - С. 167–170.

10. Савченко Г.А. Использование территории степным сурком (*Marmota bobak* Mull.) на северо-востоке Украины - Дис. канд. біол. наук: 03.00.08, 03.00.16 Зоологія, екологія - Харків - 2002 - 158 с.

11. Савченко Г.А., Ронкин В. И. Пространственная структура поселения *Marmota bobak* на северо-востоке Украины. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна*. Серія: біологія. 2008. С. 110–116.

12. Токарский В.А. Байбак в других представители рода Сурки. Харьков, 1997. 303 с.

13. Токарский В.А. Историческое изменение ареала и численности степного сурка (*Marmota bobak* Mull., 1776) в Украине. *Уч. Зап. Таврического нац. Университета им. В. И. Вернадского*. Сер. “Биология, химия”. 2004 17(56). 2. С. 173–185.

14. Токарський В. А. Стан популяції бабака (*Marmota bobak* Mull., 1776) у Харківській області на початку ХХІ століття *Науковий вісник Ужгородського університету*: серія Біологія. 2005.17. С. 184–189.

15. Токарський В. А. Розміщення, щільність та чисельність бабака (*Marmota bobak* Muller, 1776) в Луганській області на межі ХХ та ХХІ століття. Харків, 2009.

16.Токарський В.А. Біологія і екологія європейського бабака *Marmota bobak* (Müller, 1776) та його сучасний стан. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора біологічних наук. Київ, 2010.

17.Токарський В.А. Бабак степовий (*Marmota bobak* Müller,1776) в Україні. *Фауна України на межі XX-XXI ст. Стан і біорізноманіття екосистем природоохоронних територій*. Матеріали Міжнародної зоологічної конференції (м.Львів-сmt Шацьк, 12-15 вересня 2019 р). Львів:Сполом, 2019. С.168-170

18.Токарський, В.А., Атемасова Т.А., Горелова Л.М. Охорона рідкісних та зникаючих видів тварин та рослин на заповідних територіях у Харківській області. Харків: ХНУ імені В.Н.Каразіна. 2002. - 60 с.

19.Токарский В.А., Грубник В.В., Авдеев А.С. Реакклиматизация степного сурка (*Marmota bobak* Mull., 1776) в Украине (Харьковская, Полтавская, Сумская, Запорожская и Днепропетровская области). *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна*. Серія: біологія. 2006. 4 (748) - С. 100–109.

20.Токарський В., Грубник В., Атемасов А. Результати реінтродукції степового бабака (*Marmota bobak* Mull. 1776 (Rodentia, Sciuridae)) в південних районах Правобережної України *Вісник Львівського університету*. Серія: Біологічна. 2019.80. - С. 160–169.

21.Токарський В. А., Ронкін В. І., Савченко Г. О. Європейський степовий сурок: історія і сучасність - Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна 2011 - С. 1–200.

22.Allainé, D., Rodrigue, I., Berre, M., & Ramousse, R. Habitat preferences of alpine marmots, *Marmota marmota* - Canadian Journal of Zoology, 1994 - 72, 2193-2198.

DOI: <https://doi.org/10.1139/Z94-293>.

23. Armitage, K. Evolution of Sociality in Marmots. *Journal of Mammalogy*, 1999. 80, 1-10. <https://doi.org/10.2307/1383202>.
24. Elphick, Chris S. How you count counts: the importance of methods research in applied ecology. *Journal of Applied Ecology* 2008. 45.5. 1313-1320.
25. Bibikov D. The steppe marmot—its past and future - *Oryx* - 1991 - Т. 25 - С. 45–49 - DOI: <https://doi.org/10.1017/S0030605300034062>.
26. Biurrun I., Pielech R., Dembicz I., Ronkin V., Savchenko G., Zhao L., Dengler J. Benchmarking plant diversity of Palaearctic grasslands and other open habitats - *Journal of Vegetation Science* - 2021 - Т. 32 - Вип. 4 - DOI: https://www.researchgate.net/publication/352671342_Benchmarking_plant_diversity_of_Palaearctic_grasslands_and_other_open_habitats.
27. Brusentsova N., Vasyliuk O. Is it more visible from above? Comparison of the effectiveness of methods for locating bobak marmot, *Marmota bobak* (Rodentia, Sciuridae), burrows in Ukraine - *Zoodiversity* - 2024 - Т. 58 - Вип. 5 - С. 411.
28. Carrier B., Hamel S., Garel M., Côté S. D. Coping with seasonality: dynamics of adult body mass and survival in an alpine hibernator - *Oikos* - 2022 - Art. e09043 - DOI: 10.1111/oik.09043.
29. Clarke K. R., Somerfield P. J., Gorley R. N. Clustering in non-parametric multivariate analyses - *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* - 2016 - Т. 483 - С. 147–155 - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2016.07.010>.
30. Collier T., Blumstein D., Girod L., Taylor C. Is Alarm Calling Risky? Marmots Avoid Calling from Risky Places - *Ethology: Formerly Zeitschrift für Tierpsychologie*. 2010. 116. - С. 1171–1178 - DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1439-0310.2010.01830.x>.

31.Common M., Norton T. Biodiversity, natural resource accounting and ecological monitoring - Environmental and Resource Economics - 1994 - DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00691931>.

32.Corlatti L., Nelli L., Bertolini M., Zibordi F., Pedrotti L. A comparison of four methods to estimate population size of Alpine marmot (*Marmota marmota*) - *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy*. 2017. DOI: 10.4404/hystrix-28.1-11698.

33.De Kort H., Prunier J., Ducatez S., Honnay O., Baguette M., Stevens V., Blanchet S. Life history, climate and biogeography interactively affect worldwide genetic diversity of plant and animal populations. *Nature Communications*. 2021. 12.

DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-20958-2>.

34.Forti A., Partel P., Orsingher M., Volcan G., Dorigatti E., Pedrotti L., Corlatti L. A comparison of capture-mark-recapture and camera-based mark-resight to estimate abundance of Alpine marmot (*Marmota marmota*). *Journal of Vertebrate Biology*.2022. 71.

DOI: <https://doi.org/10.25225/jvb.22023>.

35.Han X., Gao H., Yang J., Li Y., Geng W. Advances in Ecological Applications of Fengyun Satellite Data. *Journal of Meteorological Research*. 2021. 35. C. 743–758

DOI: <https://doi.org/10.1007/s13351-021-1027-9>.

36.Hoang Trinh-Dinh, Wearn O. R., Ngoprasert D., Wich S., Savini T. A drone-based population survey of Delacour's langur (*Trachypithecus delacouri*) in the karst forests of northern Vietnam. *Biological Conservation* 2024. 300.

37.Kerhoulas N.J., Gunderson A.M., Olson L.E. Complex history of isolation and gene flow in hoary, Olympic, and endangered Vancouver Island

marmots. *Journal of Mammalogy*. 2015. 96 (4). C. 810–826 - DOI: <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyv089>.

38. Kidney D., Rawson B., Borchers D., Stevenson B., Marques T., Thomas L. An Efficient Acoustic Density Estimation Method with Human Detectors Applied to Gibbons in Cambodia. *PLoS ONE*. 2016. 11. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155066>.

39. Koshkina A., Grigoryeva I., Tokarsky V., Urazaliyev R., Kuemmerle T., Hölzel N., Kamp J. Marmots from space: assessing population size and habitat use of a burrowing mammal using publicly available satellite images. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*. 2019. 6 DOI: <https://doi.org/10.1002/rse2.138>.

40. Larue M., Stapleton S., Anderson M. Feasibility of using high. resolution satellite imagery to assess vertebrate wildlife populations. *Conservation Biology*. 2017. 31. DOI: <https://doi.org/10.1111/cobi.12809>.

41. Lesiv M., See L., Bayas J., Sturn T., Schepaschenko D., Karner M., Moorthy I., McCallum I., Fritz S. Characterizing the Spatial and Temporal Availability of Very High Resolution Satellite Imagery in Google Earth and Microsoft Bing Maps as a Source of Reference Data. *Land*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/LAND7040118>.

42. Liu W., Kogan F. Monitoring regional drought using the Vegetation Condition Index. *International Journal of Remote Sensing*. 1996. 17. C. 2761–2782. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431169608949106>.

43. Ma Y., Liu P., Li Z., et al. High genetic diversity of the Himalayan marmot relative to plague outbreaks in the Qinghai. Tibet Plateau, China. *BMC Genomics*. 2024. T. 25 (1). C. 262. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12864. 024. 10171. y>.

44. Munteanu C., Kamp J., Nita M., Klein N., Kraemer B., Müller D., Koshkina A., Prishchepov A., Kuemmerle T. Cold War spy satellite images reveal long term declines of a philopatric keystone species in response to cropland expansion. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2020. 287. Art. 20192897. DOI: 10.1098/rspb.2019.2897.

45. Neumann W., Martinuzzi S., Estes A., Pidgeon A., Dettki H., Ericsson G., Radeloff V. Opportunities for the application of advanced remotely sensed data in ecological studies of terrestrial animal movement. *Movement Ecology*. 2015. 3.

DOI: <https://doi.org/10.1186/s40462-015-0036-7>.

46. Parmesan C., Burrows M., Duarte C., Poloczanska E., Richardson A., Schoeman D., Singer M. Beyond climate change attribution in conservation and ecological research. *Ecology Letters*. 2013. 16 (Suppl. 1). C. 58–71. DOI: <https://doi.org/10.1111/ele.12098>.

47. Polchaninova N., Savchenko G., Ronkin V. A cry in the steppes. Velykoburlutskyi steppe in Northeastern Ukraine. *Palaearctic Grasslands*. 2020. 46. C. 86–87. DOI: https://edgg.org/sites/default/files/page/Palaearctic_Grasslands_46_0.pdf.

48. Rashevskaya H., Semeniuk S. A Unique Colony Of The Bobak Marmot, *Marmota Bobak* (Rodentia, Sciuridae), In Steppes Of The Right-Bank Ukraine. *Vestnik Zoologii*. 2015. 49 (4) DOI: [10.1515/vzoo-2015-0042](https://doi.org/10.1515/vzoo-2015-0042)

49. Ronkin V., Savchenko G., Tokarsky V. The place of the steppe marmot in steppe ecosystems of Ukraine: An historical approach. *Ethology Ecology & Evolution*. 2010. 21.4. C. 277–284.

DOI: 10.1080/08927014.2009.9522482.

50. Ronkin V., Tokarsky V., Polchaninova N., Atemasov A., Koshkina A., Savchenko G. Comparative assessment of ecological plasticity of the steppe marmot between Ukrainian and Kazakhstan populations: challenges of the man-induced environmental changes. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2020. 8. Art. 219. DOI: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fevo.2020.00219/full>.

51. Savchenko G., Ronkin V. Grazing, abandonment and frequent mowing influence the persistence of the steppe marmot, *Marmota bobak*. *Hacquetia*. 2018. 17. 1. C. 25–34. DOI: <https://ojs.zrc-sazu.si/hacquetia/article/view/6715>.

52. Seddon P., Armstrong D., Maloney R. Developing the Science of Reintroduction Biology. *Conservation Biology*. 2007. 21. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00627.x>.

53. Smith J.E., Gamboa D.A., Spencer J.M., Travenick S.J., Ortiz C.A., Hunter R.D., Sih A. Split between two worlds: automated sensing reveals links between above- and belowground social networks in a free-living mammal. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 2018. 373. Art. 20170249. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0249>.

54. Stephens P.A., Frey-Roos F., Arnold W., Sutherland W.J. Model complexity and population predictions: The Alpine Marmot as a case study. *Journal of Animal Ecology*. 2002. 71. C. 343–361.

55. Vasyliuk O. Distribution of *Marmota bobak* in Luhansk, Kharkiv, and Donetsk regions (Ukraine) according to remote probing of the Earth. Ukrainian Nature Conservation Group (NGO). Occurrence dataset. 2024. Версія 1.5. DOI: <https://doi.org/10.15468/6zy8bq>.

56. Viviano A., Mori E. Aliens in their native country: the case of the Alpine marmot (*Marmota marmota*, Linnaeus, 1758) (Mammalia, Rodentia) in the

Apennine ridge. *Biogeographia. The Journal of Integrative Biogeography*. 2021. 36. DOI: <https://doi.org/10.21426/B636054517>.

57. Zhang L., Chang Q., Fu D., Cen Y., Tong Q. Evaluating an Enhanced Vegetation Condition Index (VCI) Based on VIUPD for Drought Monitoring in the Continental United States. *Remote Sensing*. 2016. 8. 224. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs8030224>.

58. Walz A. M., Weber M. M. The use of NDVI threshold values to evaluate actively growing vegetation across diverse vegetation types in the western United States. *Journal of Applied Ecology*. 2021. 45. C. 1313–1320. DOI: <https://doi.org/10.1111/J.1365-2664.2008.01545.X>.

59. Xie Q., Dash J., Huang W., Peng D., Qin Q., Mortimer H., Casa R., Pignatti S., Laneve G., Pascucci S., Dong Y., Ye H. Vegetation Indices Combining the Red and Red-Edge Spectral Information for Leaf Area Index Retrieval. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2018. 11. C. 1482–1493

DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2813281>.