

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТУСА

ГАВАЖКО АНАСТАСІЯ ГРИГОРІВНА

Допускається до захисту:

В.о. завідувача кафедри біофізики і фізіології
кандидат хім. наук, доцент _____ О. І. Доценко
« ____ » _____ 2025 р.

**АВТОМАТИЗОВАНІ МЕТОДИ АНАЛІЗУ ЗВУКОВОГО ЛАНДШАФТУ
ДЛЯ МОНІТОРИНГУ БІОРІЗНОМАНІТТА**

Спеціальність 091 Біологія та біохімія

Кваліфікаційна (магістерська) робота

Науковий керівник:

Міщенко А.М., к.б.н., старший викладач
кафедри біофізики та фізіології

Оцінка: ____ / ____ / ____

(бал/за шкалою ЄКТС/за національною шкалою)

Голова ЕК: _____

Вінниця 2025

Анотація

Гаважко А. Г. Автоматизовані методи аналізу звукового ландшафту для моніторингу біорізноманіття. Кваліфікаційна робота магістра. Спеціальність 091 Біологія та біохімія. Донецький національний університет імені Василя Стуса, Вінниця, 2025.

Зниження біорізноманіття в умовах урбанізації потребує впровадження нових методів моніторингу, здатних забезпечувати довготривалі, неінвазивні та масштабовані спостереження. У магістерській роботі досліджуються можливості використання пасивного акустичного моніторингу та автоматизованого аналізу звукового ландшафту для оцінювання стану орнітофауни міського середовища. Для цього було організовано місячний цикл нічно-ранкових аудіозаписів у районі з приватною забудовою м. Вінниця. На основі нейромережевої моделі BirdNET виконано автоматичну детекцію вокалізацій птахів і визначення кількості видів та кількості вокалізацій у кожному записі. Паралельно для кожного аудіофрагмента обчислено вісім біоакустичних індексів (ACI, ADI, AEI, BI, NDSI, H, Hf, Ht), що характеризують структуру звукового середовища та співвідношення між його біофонічною, антропофонічною та геофонічною складовими. Показано, що індекси ACI та BI найкраще відображають добову динаміку вокальної активності птахів, тоді як NDSI демонструє найбільшу узгодженість із кількістю видів. Встановлено, що спектрально-ентропійні індекси характеризуються високою редундантністю та чутливістю до фонового шуму комах, що знижує їхню інформативність щодо орнітофауни. Отримані результати підтверджують можливість використання поєднання BirdNET та акустичних індексів як ефективного інструмента для моніторингу біорізноманіття в урбанізованих екосистемах.

Ключові слова: біорізноманіття, BirdNET, пасивний акустичний моніторинг, біоакустичні індекси, soundscape, урбанізація, ecoacoustics.

Abstract

Havazhko A. H. Automated Methods of Soundscape Analysis for Biodiversity Monitoring. Master's Thesis. Specialty 091 Biology and Biochemistry. Vasyl' Stus Donetsk National University, Vinnytsia, 2025.

The decline of biodiversity under conditions of urbanization necessitates the development of new monitoring methods capable of providing long-term, non-invasive, and scalable observations. This master's thesis investigates the applicability of passive acoustic monitoring and automated soundscape analysis for assessing the status of urban avifauna. For this purpose, a month-long series of night and early-morning audio recordings was collected in a residential area of Vinnytsia. Based on the BirdNET neural network model, automatic detection of bird vocalizations was performed, enabling the identification of species richness and vocal activity for each audio segment. In parallel, eight bioacoustic indices (ACI, ADI, AEI, BI, NDSI, H, Hf, Ht) were calculated for each audio fragment to characterize the structure of the acoustic environment and the balance between its biophonic, anthropophonic, and geophonic components. The results show that the ACI and BI indices best reflect the diurnal dynamics of bird vocal activity, while NDSI demonstrates the strongest correspondence with species richness. Spectral-entropy indices exhibit high redundancy and sensitivity to insect background noise, which reduces their informativeness regarding avifauna. The findings confirm the potential of combining BirdNET detection with acoustic indices as an effective tool for biodiversity monitoring in urbanized ecosystems.

Keywords: biodiversity, BirdNET, passive acoustic monitoring, bioacoustic indices, soundscape, urbanization, ecoacoustics.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АКУСТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ БІОРІЗНОМАНІТТЯ.....	12
1.1. Показники біорізнманіття	12
1.3 Ефективність різноманітних акустичних індексів для оцінки біофонії.....	17
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	21
2.1 Реєстрація звуків птахів	21
2.2 Автоматична детекція видів птахів за допомогою BirdNET.....	22
2.3 Розрахунок акустичних індексів	24
2.4 Статистичний аналіз.....	25
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ ...	28
3.1 Автоматизований аудіозапис.....	28
3.2 Автоматична класифікація видів за допомогою BirdNET.....	29
3.3 Вибір біоакустичних індексів.....	30
3.4 Часові ряди автоматичного виявлення видів за допомогою BirdNET та часові ряди акустичних індексів	31
3.4.1 Часові ряди біоакустичних індексів.....	32
3.4.2 Часові ряди індексів біорізнманіття	34
3.4.3 Порівняння часових рядів біорізнманіття та акустичних індексів	35
3.4.4 Спектрограми 600-секундних записів	36
3.5 Кореляційний аналіз часових рядів даних автоматичного виявлення видів.....	41
3.5.1 Кореляції між біоакустичними індексами	41
3.5.2 Кореляції між показниками біорізнманіття та акустичними індексами.....	43
3.5.3 Інтерпретація результатів кореляційного аналізу	47
3.6 Обговорення отриманих результатів	48

3.6.1 Роль пасивного акустичного моніторингу та автоматизованого аналізу.....	50
3.6.2 Проблематика та обмеження дослідження	50
3.6.3 Перспективи подальших досліджень.....	51
ВИСНОВКИ	54



ВСТУП

Біорізноманіття планети стрімко зменшується, що становить глобальну екологічну проблему. За останні кілька десятиліть спостерігається суттєвий спад чисельності дикої природи – за даними міжнародних оцінок, у середньому чисельність популяцій хребетних тварин знизилася приблизно на 68–70% з 1970 року. Близько одного мільйона видів перебувають під загрозою зникнення внаслідок людської діяльності [1]. В цих умовах зростає актуальність моніторингу біорізноманіття – систематичного відстеження стану та змін живої природи. Моніторинг необхідний для вчасного виявлення спадів чисельності видів, оцінки ефективності заходів збереження та ухвалення науково обґрунтованих рішень у сфері охорони довкілля. Традиційні підходи до моніторингу біорізноманіття ґрунтуються на польових дослідженнях – обліках видів, візуальних спостереженнях, виловах тощо. Такі методи є трудомісткими, потребують участі фахівців та значних витрат часу, а також охоплюють обмежені території і короткі інтервали спостережень. Наприклад, орнітологічні обліки птахів традиційно проводяться експертами вранці протягом кількох годин, що дає фрагментарний зріз стану екосистеми. Крім того, людський фактор може призводити до похибок – різні спостерігачі можуть по-різному ідентифікувати види, а деякі види залишаються непоміченими. Отже, виникає потреба в новітніх методах, здатних автоматизувати та розширити процес моніторингу.

В останні десятиліття формується також напрям пасивного акустичного моніторингу – відстеження біорізноманіття за допомогою звукозапису сигналів тварин у природі. Багато видів тварин подають звукові сигнали (вокалізації), що дає змогу фіксувати їхню присутність на значній території і протягом тривалого часу, недоступного при візуальних спостереженнях. Датчики (автономні рекордери) можна встановлювати в середовищі проживання видів і безперервно записувати звуки протягом днів і тижнів. Такий підхід є відносно економічним і

ненав'язливим, не турбує дикі організми. Важливо й те, що аудіозаписи створюють постійний архів даних, до якого можна повернутися для повторного аналізу [2]. Завдяки цьому пасивний акустичний моніторинг набув широкого застосування для дослідження різних груп тварин – від комах і жаб до птахів і ссавців, зокрема прихованоживучих або рідкісних видів. Нині все ще значна частина акустичних досліджень покладається на ручну обробку – візуальний перегляд спектрограм або прослуховування записів експертами. Автоматизація розпізнавання видів за звуком є складним завданням: створення надійних алгоритмів (“розпізнавачів”) для кожного виду вимагає великої вибірки звукозаписів і спеціальних знань у галузі біоакустики та машинного навчання. До недавнього часу подібні автоматичні системи були розроблені лише для обмеженої кількості таксонів (наприклад, окремі алгоритми для кажанів, деяких птахів тощо), що стримувало широке впровадження акустичного моніторингу в практику. Починаючи з 2010-х років, завдяки прогресу в галузі штучного інтелекту, з'явилися нові автоматизовані підходи до аналізу звукового ландшафту. Одним з найбільш успішних є система BirdNET – глибока нейронна мережа для автоматичного розпізнавання птахів за звуком [3]. Розроблена дослідниками Корнельської лабораторії орнітології (США) та Технічного університету в Хемніці (Німеччина), модель BirdNET здатна ідентифікувати за аудіозаписом голосів 984 види птахів Північної Америки та Європи. Після оновлень алгоритм охоплює вже понад 3000 видів по всьому світу, що робить його потужним інструментом глобального моніторингу. Ефективність BirdNET підтверджена випробуваннями: середня точність моделі перевищує 79% при розпізнаванні окремих сигналів птахів. Впровадження таких AI-інструментів значно спрощує аналіз акустичних даних і дозволяє автоматично отримувати видовий склад спільнот за звуковими записами, зменшуючи потребу в ручній ідентифікації.

Іншим напрямом автоматизації акустичного моніторингу є розрахунок акустичних індексів – статистичних показників, що узагальнюють інформацію про звуковий ландшафт. Замість того, щоб визначати конкретні види, ці показники кількісно характеризують структуру звукової сцени – наприклад, наскільки вона насичена звуками, наскільки різноманітні частоти звуків, чи домінує якийсь один вид вокалізацій тощо. Розроблено десятки різних акустичних індексів, серед яких найбільш відомі: індекс акустичної складності (ACI), індекс акустичного різноманіття (ADI), індекс акустичної рівномірності (AEI), біоакустичний індекс (BI), індекс акустичної ентропії (H) та нормалізований диференційований індекс звукового ландшафту (NDSI). Кожен з них відображає певний аспект акустичної активності. Приміром, ACI оцінює варіативність інтенсивності звуку і підвищується за наявності нерегулярних біологічних сигналів (таких як спів птахів), тоді як монотонні шуми (напр. шум дороги) дають нижче значення ACI [4]. ADI розраховується як різноманітність сигналів по частотних смугах на основі індексу Шеннона; високі значення ADI відповідають більш рівномірному заповненню різних частот біофонії. NDSI порівнює співвідношення біофонії (біологічних звуків) та антропофонії (антропогенних шумів) і таким чином характеризує рівень антропогенного впливу на звуковий ландшафт. Головною перевагою індексного підходу є те, що для його застосування не потрібні експерти з біоакустики: обчислення індексів здійснюється автоматично за аудіозаписом за допомогою програмних засобів, і навіть дуже великі обсяги даних можна обробити відносно швидко.

Однак останні дослідження показують, що індексний підхід має суттєві недоліки. По-перше, значення індексів можуть сильно залежати від фонових шумів неживої природи або людини. Наприклад, шуми вітру, дощу або транспорту здатні “маскувати” біологічні сигнали і штучно змінювати показники індексів, не відображаючи реального біорізноманіття. Деякі індекси виявилися особливо чутливими до таких перешкод: зокрема, наявність поблизу дороги

знижує значення АСІ та інших показників біофонії, навіть якщо видове багатство залишається високим[5]. По-друге, різні індекси часто дають суперечливі оцінки. Кожен індекс фіксує лише окремий аспект звукового середовища, тому для комплексної оцінки рекомендують обчислювати кілька різних індексів одночасно. По-третє, емпіричні роботи продемонстрували непослідовність зв'язку між акустичними індексами та традиційними показниками біорізноманіття. Згідно з мета-аналізом 49 досліджень, середній коефіцієнт кореляції між значеннями акустичних індексів і кількісними показниками біорізноманіття (напр. числом видів або індексом Шеннона) становить лише близько $r = 0,3$, тобто залежність є помірною[6]. В ряді випадків індекси взагалі не показали значущого зв'язку з реальним видовим різноманіттям. Це особливо стосується середовищ із високим рівнем антропогенного шуму.

Таким чином, постає наукова проблема: наскільки ефективними є акустичні індекси як інструмент моніторингу біорізноманіття, і чи можуть вони конкурувати з більш “розумними” підходами, такими як BirdNET, у точності відображення живої природи? Більшість досліджень акустичних індексів виконано в природних або заповідних екосистемах; значно менше відомо про їхню дієвість у умовах міського середовища, де акустичний ландшафт складається як із біофонії (спів міських птахів, звуки комах), так і з інтенсивної антропофонії. Автоматизована система BirdNET, фокусуючись на розпізнаванні саме біологічних звуків, потенційно здатна ігнорувати несуттєві шуми і видавати більш релевантні дані про видовий склад, тоді як узагальнені індекси можуть реагувати на будь-який звук. Важливо з'ясувати, чи корелюють показники акустичних індексів з фактичним біорізноманіттям, оціненим за допомогою BirdNET (або інших надійних методів), і чи можуть індекси слугувати достовірним індикатором біофонії.

Об’єкти дослідження. Акустичне середовище міської території з приватною забудовою, а також методи автоматичного аналізу звукових записів для оцінки біорізноманіття.

Предмет дослідження. Акустичні індекси та результати нейромережевої детекції вокалізацій птахів (BirdNET) як засоби оцінки біорізноманіття.

Мета дослідження. Оцінити ефективність біоакустичних індексів для моніторингу біорізноманіття у міських умовах шляхом порівняння їх із результатами автоматизованої ідентифікації видів птахів, отриманими за допомогою нейромережі BirdNET.

Завдання. В рамках мети розв’язувались такі задачі:

- Провести огляд сучасних екоакустичних досліджень, що стосуються акустичних індексів.
- Здійснити детекцію вокалізацій птахів за допомогою BirdNET.
- Розрахувати акустичні індекси (ACI, ADI, AEI, BI, NDSI, H, Hf, Ht).
- Побудувати часові ряди індексів та показників BirdNET і провести їх порівняльний аналіз.

Методи дослідження. Пасивний акустичний моніторинг (ПАМ), нейромережевий аналіз аудіо за допомогою BirdNET. Також використання Python-бібліотек для обробки даних (birdnetlib, Acoustic_Indices) та аналіз часових рядів.

Наукова новизна дослідження. Уперше проведено порівняльний аналіз добових динамік акустичних індексів та результатів нейромережевого виявлення видів у приватному секторі міста Вінниця. Обґрунтовано потенційне використання акустичних індексів як заміника експертного або BirdNET-аналізу в умовах міського середовища.

Практичне значення отриманих результатів. Результати можуть бути використані в системах екологічного моніторингу, урбаністичному плануванні, для оптимізації спостереження за біорізноманіттям у містах без залучення експертів.

Апробація. Окремі результати дослідження були презентовані в рамках звіту з переддипломної практики, а також обговорювались на засіданнях кафедри біофізики та фізіології.

Структура і обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів (теоретичного, методологічного, результатів і обговорення, висновків), списку літератури та додатків. Загальний обсяг становить 59 сторінок містить понад 11 рисунків, 2 таблиці та 24 джерел літератури.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АКУСТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ БІОРІЗНОМАНІТТЯ

1.1. Показники біорізноманіття

Біорізноманіття є ключовою властивістю екосистем, що характеризує різноманітність форм життя на всіх рівнях їхньої організації — від генетичної варіабельності окремих популяцій до структурної складності екосистемних угруповань [7]. Згідно з міжнародною практикою екологічного моніторингу, кількісна оцінка біорізноманіття базується на наборі показників, які дозволяють визначити кількість видів, їхню чисельність, відносні пропорції в угрупованні, а також рівномірність розподілу особин між видами. Ці показники використовують для аналізу стану природних та антропогенно трансформованих екосистем, визначення ступеня екологічного стресу та виявлення тенденцій зміни структури біоценозів у часі. Однією з центральних проблем біомоніторингу є вибір таксонів та територій для спостереження. У різних масштабах дослідники можуть вивчати як одноклітинні організми в ґрунтовому зразку, так і різноманіття деревних порід у міському парку. У міському середовищі найбільш поширеним є моніторинг рослин, птахів, амфібій та комах, оскільки ці групи організмів чутливо реагують на якість повітря, ґрунту, шумове навантаження, урбанізацію та фрагментацію середовищ [8]. Рослини виступають індикаторами якості ґрунту і повітря, оскільки вони не можуть переміщуватися та відображають стан локальних факторів середовища. Птахи, будучи мобільними та високочутливими до змін, швидко залишають деградовані території, що робить їх ефективними індикаторами екологічного стресу. Амфібії залежать від чистоти водойм та наявності лісових біотопів, а будь-яке погіршення якості тимчасових ставків безпосередньо впливає на їхню репродукцію. Комахи, зокрема запилювачі та види-сапрофаги, також надзвичайно чутливі до навіть незначних змін довкілля.

Видове багатство (Species Richness) є базовим показником біорізноманіття, що визначає загальну кількість видів певної групи організмів, які присутні у вибірці або на досліджуваній території [7]. Кожен вид ураховується лише один раз — незалежно від того, скільки особин цього виду виявлено. Це дозволяє швидко отримати оцінку загальної різноманітності, проте не дає можливості врахувати різницю між поширеними й рідкісними видами. Попри простоту, показник видового багатства є надзвичайно інформативним: дослідження у тропічних лісах показали, що одна лише крона дерева може містити понад тисячу видів комах, більшість з яких раніше не були описані (класичне дослідження Ервіна, 1982) [9]. Видова рівномірність (Evenness, Relative Abundance) відображає ступінь, до якого особини різних видів представлені подібною чисельністю. У стабільних екосистемах види зазвичай представлені відносно рівномірно, тоді як за умов стресу або порушень виникає домінування окремих видів, що свідчить про деградацію екологічної структури. Видова рівномірність безпосередньо пов'язана з відносною чисельністю — показником, який враховує кількість особин кожного виду у загальній вибірці. Разом із видовим багатством рівномірність формує основу для інтегрованих індексів біорізноманіття.

Індекс Сімпсона (Simpson Diversity Index) є одним із найпоширеніших інтегральних показників, що враховує одночасно видове багатство та рівномірність. Його інтерпретація ґрунтується на ймовірності того, що два випадково вибрані індивіди з вибірки належать одному й тому самому виду [10]. Особливістю індексу Сімпсона є те, що він більше зважає на поширені, численні види, тому добре підходить для оцінки домінування в угрупованні. Значення індексу, близькі до 1, свідчать про низьку різноманітність і сильне домінування кількох видів. Значення, наближені до 0, вказують на високу різноманітність та збалансовану структуру спільноти. Індекс широко застосовується в екології лісових, степових, водних та урбанізованих екосистем для фіксації тенденцій деградації або відновлення. Індекс Шеннона–Вінера (Shannon–Wiener Index)

оцінює як видове багатство, так і рівномірність, однак на відміну від Сімпсона він чутливіший до рідкісних видів [11]. Він відображає ступінь невизначеності у прогнозуванні того, представник якого виду з'явиться наступним у випадковій вибірці. Чим більша непередбачуваність (тобто чим вищий внесок рідкісних видів), тим більшим буде значення індексу. Це робить індекс Шеннона особливо корисним для вивчення урбанізованих та екологічно порушених територій, де рідкі види відіграють важливу діагностичну роль.

Практичне застосування показників біорізноманіття. Індекси різноманіття дозволяють порівнювати різні екосистеми між собою, виявляти ефект антропогенного тиску, діагностувати стан середовищ існування. Також визначати рівень екологічної деградації, оцінювати ефективність природоохоронних заходів та проводити довгострокові екологічні спостереження [12].

У міських екосистемах особливе значення мають птахи, амфібії та комахи, які реагують на шум, фрагментацію середовищ, світлове забруднення та деградацію зелених зон. Структура їхніх угруповань є одним із ключових індикаторів екологічної стійкості міського простору [7].

1.2 Акустичні індекси біорізноманіття

Пасивний акустичний моніторинг (Passive Acoustic Monitoring, PAM) на сьогодні є одним із найбільш перспективних інструментів оцінювання стану екосистем, особливо у контексті міських та антропогенно трансформованих середовищ. Використання довготривалих аудіозаписів дає змогу реєструвати активність біофонії, геофонії та антропофонії без необхідності постійної присутності дослідника, що суттєво підвищує точність та репрезентативність екологічних спостережень [13]. Розвиток апаратного забезпечення, алгоритмів цифрової обробки сигналів та методів машинного навчання сприяв появі

широкого спектра акустичних індексів, які кількісно відображають структуру звукового ландшафту. Акустичні індекси являють собою математичні показники, що розраховуються на основі спектральних та часових характеристик аудіосигналу. Вони дозволяють узагальнювати складні біоакустичні процеси, забезпечуючи можливість масштабного аналізу великих масивів даних та порівняння звукових середовищ у просторі й часі. Згідно з Gibb et al. (2023) [13], ці індекси виконують три основні функції: відображення інтенсивності та структурних характеристик біофонії, оцінювання екологічного стану середовища, включно з рівнем антропогенного шуму та забезпечення можливості довготривалого моніторингу екосистем з високою часовою роздільністю. Tuia et al. (2022) [14] підкреслюють, що акустичні індекси ефективні як самостійний інструмент аналізу, так і в поєднанні з нейромережевими класифікаторами, такими як BirdNET, що значно підвищує точність визначення видового складу.

Наразі найбільш поширеними є індекси, що характеризують спектральну складність сигналу, рівномірність розподілу енергії, різноманіття частотних компонентів та співвідношення між біофонією та антропофонією. Нижче в таблиці наведено найбільш інформативні індекси есоacoustics, що широко застосовуються при дослідженні біорізноманіття.

Таблиця 2.1 Використані акустичні та біорізноманітні індекси

№	Позначення	Повна назва індексу	Тип індексу	Короткий опис
1	ACI	Acoustic Complexity Index	Акустичний	Відображає складність звукового сигналу; зростає при збільшенні кількості імпульсних біологічних звуків (вокалізацій).
2	ADI	Acoustic Diversity Index	Акустичний	Показує різноманітність енергії у частотних смугах; вищий при рівномірному заповненні спектра.

3	AEI	Acoustic Evenness Index	Акустичний	Відображає рівномірність розподілу енергії між частотними діапазонами; знижується при домінуванні певних частот.
4	BI	Bioacoustic Index	Акустичний	Оцінює інтенсивність біофонії в частотному діапазоні 2–8 кГц, характерному для пташиних вокалізацій.
5	NDSI	Normalized Difference Soundscape Index	Акустичний	Визначає співвідношення біофонії до антропофонії; позитивні значення свідчать про домінування природних звуків.
6	H	Acoustic Entropy Index	Акустичний	Вимірює хаотичність звукового сигналу, поєднуючи часову та спектральну ентропію.
7	num_species	Кількість видів	Біорізноманіття	Кількість різних видів птахів, виявлених у межах одного запису (на основі BirdNET).
	num_songs	Кількість вокалізацій	Біорізноманіття	Загальна кількість окремих вокалізацій птахів у межах запису.

Сучасні дослідження показують, що акустичні індекси є ефективним засобом виявлення екологічних змін у реальному часі. Вони дозволяють виявляти деградацію середовищ, оцінювати рівень антропогенного шуму, вивчати просторово-часові патерни біофонії та аналізувати екосистемну динаміку у довгострокових моніторингових програмах [12]. Поєднання акустичних індексів із алгоритмами машинного навчання, описаними Tuia et al. (2022) [14], сформувало новий підхід до біомоніторингу — автоматизований аналіз звукових ландшафтів, здатний працювати з обсягами даних, що раніше були непридатні для ручної обробки. У міських екосистемах такий підхід є особливо важливим, оскільки дозволяє об'єктивно оцінювати реакцію біоти на шумові, просторові та

кліматичні зміни. Акустичні індекси забезпечують можливість систематичного аналізу, що є критично важливим для досліджень антропогенних впливів, а також для розроблення науково обґрунтованих рекомендацій з управління міськими природними територіями.

1.3 Ефективність різноманітних акустичних індексів для оцінки біофонії

Застосування акустичних індексів як індикаторів біорізноманіття активно досліджується протягом останніх ~15 років. Їх привабливість полягає у можливості швидко узагальнювати складні акустичні дані та отримувати метрики, що потенційно пов'язані з видовим багатством або чисельністю видів [15]. Наприклад, високі значення ACI чи BI можуть свідчити про інтенсивну вокальну активність різних видів, тоді як низький NDSI може вказувати на домінування антропогенних шумів або відсутність біофонії. Проте ефективність окремих індексів суттєво варіює залежно від умов. Одним з викликів є вплив небіологічних звуків: індекси реагують і на цвіркотіння комах, і на шум дощу чи вітру, і на гуркіт техніки. Це може маскувати сигнал від цільових видів.

Нижче узагальнено методи та висновки п'яти новітніх досліджень, присвячених екоакустичному моніторингу біорізноманіття птахів: Latifi та ін., 2023 (Іран) – дослідження звукових ландшафтів 21 міського парку в м. Ісфахан для оцінки біорізноманіття птахів. Автори розраховали шість акустичних індексів (ACI, ADI, AEI, BI, NDSI, H) та виміряли польові показники біорізноманіття (видове багатство, рівномірність, індекси Шеннона, Сімпсона, чисельність співочих птахів) шляхом прямих спостережень. Для прогнозування біологічних індикаторів за акустичними даними було застосовано моделі машинного навчання: метод опорних векторів (SVM), Random Forest і регуляризована лінійна модель (GLMNET). Найвищу точність прогнозування показала модель SVM (найбільший R^2 для індексу співочих птахів, рівномірності

та багатства видів), що підтвердило ефективність акустичних індикаторів (зокрема H та ACI) як проксі для моніторингу пташиного різноманіття в міському середовищі. Це дослідження стало першим прикладом комплексного аналізу міського саундскейпу в Ірані, продемонструвавши потенціал екоакустичних підходів для оцінки екологічної якості міських парків [16].

Pu та ін., 2023 (Китай) – робота “Selecting appropriate acoustic indices for biodiversity assessments in different acoustic environments” (конференція CELA 2023) досліджувала, які акустичні індекси найкраще відображають різноманіття птахів в умовах значного абіотичного шуму (на прикладі об’єкта всесвітньої спадщини Цзючжайгоу). Було проаналізовано поведінку поширених індексів за наявності потужних сторонніх звуків (шум води, туристичних автобусів). Виявилося, що оцінки різних індексів помітно розходяться між собою; особливо індекс NDSI проявився як найбільш надійний та стійкий до абіотичних перешкод. Натомість інші індекси (ACI, ADI, AEI тощо) під впливом шуму давали значні похибки [17]. Результати підкреслюють, що для ефективного довгострокового моніторингу біорізноманіття важливо підбирати індекси, мало чутливі до специфічних шумових фонів, і що NDSI може слугувати стабільним показником у середовищах зі змінною геофонією та антропофонією.

Allen-Ankins та ін., 2023 (Австралія) – стаття “Effectiveness of acoustic indices as indicators of vertebrate biodiversity” (журн. Ecological Indicators) оцінила 13 акустичних індексів на шести локаціях Австралії у рамках проєкту Australian Acoustic Observatory. Паралельно проводилися традиційні обліки хребетних (пастки, точки обліку птахів), що виявили 327 видів, зокрема 172 види птахів. Акустичні дані (5965 годин запису) агрегувалися до тижневих середніх значень індексів для різних таксономічних груп. Кореляційний аналіз показав наявність помірних та сильних зв’язків (до $r_s \geq 0.5$) між деякими індексами та показниками біорізноманіття птахів і всіх хребетних. Зокрема, індекси достовірніше

передбачали видове багатство і чисельність птахів, ніж, наприклад, значення індексу Шеннона. Для амфібій і непташиних хребетних кореляції були слабшими. Застосування моделей Random Forest дозволило підвищити точність прогнозу: об'єднуючи індекси, моделі передбачали видовий склад краще, ніж будь-який окремих індекс. Визначено, що найбільший внесок у успішність моделей внесли три індекси – зокрема Cluster Count (CLS), який виявився ключовим предиктором видового багатства та індексу Шеннона для птахів [18]. Таким чином, це дослідження підтвердило, що комбінування кількох індексів і використання моделей машинного навчання підвищує надійність акустичного моніторингу біорізноманіття.

Kotiani та ін., 2024 (Індія) – стаття “Measuring biodiversity with sound: how effective are acoustic indices for quantifying biodiversity in a tropical dry forest?” досліджувала ефективність акустичних індексів у тропічному сухому лісі Центральної Індії. Протягом зимового сезону 2020–2021 рр. було зібрано аудіодані (1-хвилинні записи кожні 5 хвилин) за допомогою рекордерів AudioMoth. Видове багатство птахів визначалося ручною анотацією вибірки записів (прослуховування в Raven Pro). Розраховано 7 акустичних індексів (ACI, BI, ADI, AEI, H, NDSI, а також кількість піків спектру – NP). Кореляція Пірсона та Спірмена між індексами та кількістю видів виявилася слабкою: коефіцієнти r варіювали від 0 до ~ 0.35 . Найвищу (хоч і помірну) кореляцію показав BI ($r \approx 0.35$), тоді як AEI мав навіть негативний зв'язок ($r \approx -0.13$), а NDSI – майже нульовий ($r \approx 0.01$). Комбінація індексів у моделі GLMM дещо покращила прогнозування видової численності, але теж несуттєво. Автори підкреслюють, що хоча біоакустичний моніторинг є багатообіцяючим інструментом швидкої оцінки біорізноманіття, його потрібно ретельно валідувати для кожного нового середовища перед впровадженням у практику. У досліджуваному біомі окремі індекси мають обмежену прогностичну здатність, тому рекомендується

застосовувати кілька показників разом і враховувати особливості звукового середовища (наприклад, присутність комах, людей тощо) [19].

Clark, 2023 (США) – у роботі “Soundscape components inform acoustic index patterns and refine estimates of bird species richness” (журн. Ecological Indicators) використано надвеликий набір даних із Каліфорнії: >725 000 хвилин записів з 1195 точок, зібраних у 2017–2021 рр. автономними пристроями (AudioMoth, смартфони). В цій праці вперше інтегровано аналіз компонентів звукового ландшафту за допомогою згорткової нейромережі: кожен 2-секундний фрагмент запису було автоматично віднесено до класу біофонії, антропофонії, геофонії, тиші або перешкод. Паралельно розраховано 15 стандартних акустичних індексів (щохвилинно, з подальшим усередненням для кожної ділянки за добу та окремо для ранкового періоду 4:00–12:00). Видове багатство птахів оцінювалося на основі тієї ж нейромережевої класифікації (кількість виявлених видів із визначеного списку). Аналіз за допомогою узагальнених адитивних моделей (GAM) показав, що варіації значень акустичних індексів на 66.8% пояснюються долями різних компонентів саундскейпу, головню біофонією та технічними перешкодами у записах. Зокрема, біофонія мала сильний позитивний вплив на більшість індексів і тісно пов’язана з видовим багатством птахів. Наявність перешкод (шум приладу, вітру) істотно спотворювала АСІ та деякі інші показники. Моделювання видової численності показало, що найкраща точність (RMSE ~3.9 видів) досягається при комбінуванні предикторів: показника біофонії + набору акустичних індексів. Така об’єднана модель пояснила ~65.8% варіації в видовому багатстві, перевершивши моделі лише з індексами. Таким чином, Clark (2023) демонструє, що для підвищення надійності акустичного моніторингу доцільно поєднувати традиційні індекси з даними про структуру саундскейпу, зокрема виділяти та кількісно оцінювати біофонію (наприклад, через машинне навчання). Це допомагає відфільтрувати небіотичні шуми та отримати більш точні оцінки різноманіття птахів [20].

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Реєстрація звуків птахів

У межах дослідження було проведено пасивний акустичний моніторинг з метою реєстрації вокалізації птахів та супутніх звукових подій, характерних для міського середовища з приватною забудовою. Акустичні спостереження здійснювалися протягом одного місяця у періоді «кінець літа — початок осені» у місті Вінниця. Зазначений сезон було обрано з огляду на наявність вираженої добової активності осілих видів, часткових переміщень під час осінньої міграції та зменшення рівня антропогенних шумів у нічні й ранкові години.

Реєстрація аудіоданих проводилася у часовому інтервалі з 21:00 до 11:00, що дозволяє охопити як нічні, так і ранкові піки біофонічної активності. Запис здійснювався серіями по 10 хвилин із паузами 20 хвилин, що відповідає поширеним протоколам пасивного акустичного моніторингу та забезпечує баланс між тривалістю реєстрації та обсягом отриманих даних. Прилад був встановлений на балконі житлового будинку на висоті близько 2,5–3 м над рівнем ґрунту. Такий рівень розташування є типовим для РАМ у міських умовах, оскільки зменшує вплив приземних шумів, забезпечує кращий огляд акустичного поля та мінімізує перешкоди, пов'язані з відбиттям звуку від навколишніх об'єктів. Додатково використовувався водозахисний кожух і вітрозахист мікрофона, що дозволяло стабілізувати якість записів у випадку опадів або поривів вітру.

Запис аудіо здійснювався у форматі моно з параметрами 96 кГц та 24-бітною глибиною. Вибір таких характеристик обґрунтовується необхідністю забезпечення високої спектральної роздільної здатності для коректного подальшого аналізу біофонії та ідентифікації вокалізацій за допомогою сучасних алгоритмів машинного навчання. Формат монофонічного сигналу є достатнім

для цілей екологічного моніторингу, оскільки завданням дослідження є не визначення просторового положення джерела, а аналіз його спектральних і тимчасових характеристик. Обрані параметри також відповідають рекомендаціям, які застосовуються у сучасних есоacoustics-дослідженнях.

2.2 Автоматична детекція видів птахів за допомогою BirdNET

Для автоматичної ідентифікації вокалізацій птахів, зафіксованих у ході пасивного акустичного моніторингу, у дослідженні було використано неймережеву модель BirdNET, яка є одним із найбільш поширених та науково валідованих інструментів для bioacoustics-аналізу птахів. BirdNET розроблена Корнельською лабораторією орнітології та Університетом хіміко-технологічних наук у Хемніці і базується на глибоких згорткових нейронних мережах, оптимізованих для класифікації спектрограм вокалізацій. Модель навчена на глобальному наборі польових та музейних аудіозаписів, що забезпечує широкий охоплення видового різноманіття та високу стійкість до різних умов запису. BirdNET забезпечує розпізнавання понад 6000 видів птахів, що відповідає практично всім видам, внесеним до світових таксономічних списків. Архітектура моделі включає попереднє перетворення аудіосигналу у мел-спектрограму, подальше виділення ознак за допомогою згорткових шарів та класифікацію з використанням багатокласової моделі ймовірностей. Принцип роботи базується на аналізі коротких часових фрагментів (зазвичай 3-секундних), що дозволяє моделі виявляти навіть короткі сигнали та локальні вокальні елементи.

Однією з ключових можливостей BirdNET є обмеження списку потенційних видів за географічними координатами та датою запису. Передача моделі інформації про місце та час дозволяє автоматично виключити види, поширення яких не відповідає даному регіону чи сезону. Таким чином зменшується кількість хибних класифікацій і підвищується точність розпізнавання. У межах цього дослідження координати місця запису та часові

метадані передавалися до BirdNET через інтерфейс бібліотеки birdnetlib, що забезпечувало адаптацію моделі до локальної орнітофауни Вінницького регіону в осінній період.

Для обробки всієї сукупності аудіофайлів був створений окремий Python-скрипт із використанням бібліотеки birdnetlib, яка надає програмний доступ до BirdNET-Analyzer та BirdNET-Lite. Кожен аудіофайл аналізувався послідовно, а результати автоматичної детекції експортувалися у форматі CSV, сумісний із анотаційними файлами програми Raven Pro. У такому файлі для кожного детектованого фрагмента фіксуються: англійська та наукова назва виду, часові межі вокалізацій (start_time, end_time), величина довірчої оцінки (confidence), службова мітка моделі та українська назва виду. Приклад такого запису подано в таблиці нижче:

Таблиця 2.2 Результати детекції видів птахів за допомогою BirdNET для одного аудіофайла

common_name	scientific_name	start_time	end_time	confidence	label	common_name_uk
Eurasian Magpie	Pica pica	6.0	9.0	0.5833754539489746	Pica pica_Eurasian Magpie	Сорока звичайна
Eurasian Magpie	Pica pica	12.0	15.0	0.8499122262001038	Pica pica_Eurasian Magpie	Сорока звичайна
Eurasian Magpie	Pica pica	15.0	18.0	0.9823649525642395	Pica pica_Eurasian Magpie	Сорока звичайна

Аналіз отриманих таблиць дозволяє кількісно оцінити основні показники біорізноманіття. Зокрема, *species richness* визначається за кількістю видів, виявлених у межах певного періоду або локації; *relative abundance* — за кількістю детекцій кожного окремого виду; *evenness* та *diversity indices* (зокрема індекси Шеннона та Сімпсона) — за статистичними співвідношеннями частот появи вокалізацій різних видів. Такий підхід забезпечує можливість переходу від окремих аудіозаписів до узагальнених екологічних показників, що дозволяє інтерпретувати стан локальної орнітофауни у просторовому та часовому вимірі.

2.3 Розрахунок акустичних індексів

Для подальшого кількісного аналізу структури звукового ландшафту та оцінювання біоакустичної активності було здійснено розрахунок набору акустичних індексів, які широко застосовуються у дослідженнях *ecoacoustics*. Обробка аудіоматеріалів проводилася для кожного запису тривалістю 10 хвилин. Кожен такий запис попередньо сегментувався на однихвилинні фрагменти, що дозволяло отримати більш стабільні оцінки спектральних характеристик та уникати змішування короточасних і довготривалих звукових подій в одному інтервалі. Акустичні індекси обчислювалися окремо для кожної однієї хвилини запису, після чого значення усереднювалися для всього 10-хвилинного фрагмента. Такий підхід відповідає загальноприйнятим протоколам *ecoacoustic*-аналізу, оскільки хвилинний інтервал забезпечує компроміс між часовою роздільністю та варіативністю біофонічних сигналів. Усереднення індексів на рівні кожного запису дає змогу порівнювати між собою різні часові періоди та зменшує вплив випадкових короточасних шумових подій.

Для обчислення індексів було використано Python-бібліотеку *Acoustic_Indices*, що реалізує найбільш поширені формули спектральних та ентропійних індексів, зокрема *ACI*, *ADI*, *AEI*, *BI*, *NDSI*, спектральну ентропію та інші похідні показники. Бібліотека забезпечує автоматизоване перетворення

аудіофайлів у спектрограми, розрахунок частотних бінів та інтеграцію результатів у форматах зручних для подальшої статистичної обробки. Застосування цього інструментарію дозволило отримати стандартизовані та порівнювані між собою величини акустичних характеристик, необхідні для подальшої інтерпретації звукового ландшафту, аналізу біофонії та визначення загальних тенденцій зміни акустичного середовища протягом періоду спостережень.

2.4 Статистичний аналіз

Для оцінювання зв'язку між часовими рядами результатів автоматичного виявлення видів птахів за допомогою нейромережі BirdNET та часовими рядами акустичних індексів було використано кореляційний аналіз на основі коефіцієнта Спірмена. Такий підхід є доцільним у даному дослідженні, оскільки зв'язки між показниками біорізноманіття, отриманими з акустичних даних, як правило, не є строго лінійними, а розподіли змінних часто відхиляються від нормального. Коефіцієнт кореляції Спірмена розглядається як непараметричний аналог кореляції Пірсона і може застосовуватися як до метричних, так і до порядкових змінних; він менш чутливий до викидів та порушення нормальності розподілу.

Перед проведенням кореляційного аналізу часові ряди були приведені до спільної часової роздільності: для кожного інтервалу запису (10-хвилинний фрагмент) обчислювалися агреговані показники детекції видів за BirdNET (наприклад, кількість детекцій, кількість видів за інтервал) та відповідні усереднені значення акустичних індексів. Таким чином формувалися пари спостережень, де кожному 10-хвилинному запису відповідала одна точка у просторі «детекції BirdNET – акустичний індекс». Використання коефіцієнта Спірмена передбачає виконання двох ключових передумов: парність спостережень – кожна пара значень походить з одного й того ж інтервалу спостереження; монотонний характер зв'язку – який оцінювався шляхом

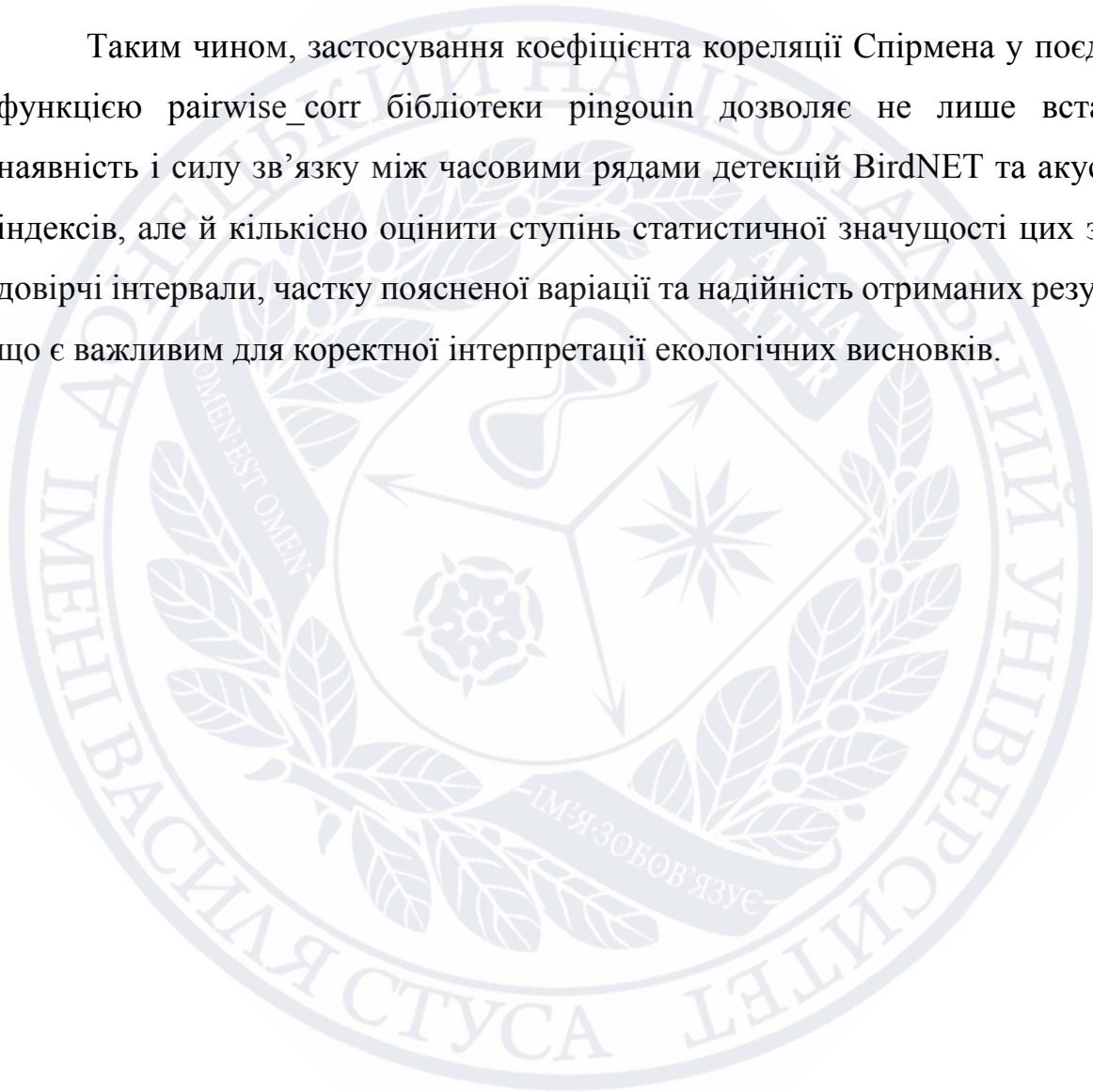
візуального аналізу точкових діаграм (scatterplot) для відповідних змінних. За наявності монотонної (але не обов'язково лінійної) залежності застосування кореляції Спірмена є статистично обґрунтованим.

Обчислення кореляцій здійснювалося за допомогою функції `pairwise_corr` бібліотеки `pingouin 0.5.5` мовою Python. Зазначена функція дозволяє отримати не лише значення коефіцієнта кореляції, але й низку додаткових показників, корисних для інтерпретації результатів. Зокрема, параметр `n` відображає розмір вибірки, тобто кількість інтервалів спостережень, що були включені до розрахунку кореляції між двома змінними. Параметр `r` є самим коефіцієнтом кореляції Спірмена, величина якого (за модулем) характеризує силу монотонного зв'язку між змінними: значення, близькі до 0, свідчать про слабкий зв'язок, тоді як значення понад 0,4–0,5 можна інтерпретувати як зв'язок середньої або високої сили залежно від контексту дослідження.

Інтервали `CI95%` (95 % довірчі інтервали) показують діапазон, у якому з імовірністю 95 % може знаходитися істинне значення коефіцієнта кореляції в генеральній сукупності. Значення `r2` та `adj_r2` (коефіцієнт детермінації та скоригований коефіцієнт детермінації) відображають частку варіації однієї змінної, яка може бути пояснена варіацією іншої. Скоригований варіант враховує кількість спостережень та є більш консервативною оцінкою, особливо при невеликих вибірках. Параметр `p-val` є р-значенням статистичного тесту на відсутність кореляції (нульова гіпотеза: $r = 0$). Загальноприйнятим є поріг статистичної значущості $\alpha = 0,05$. Якщо отримане р-значення менше за цей поріг ($p < 0,05$), нульова гіпотеза відхиляється, і робиться висновок про статистично значущий зв'язок між змінними. При цьому у випадку незначущих результатів р-значення доцільно наводити точно (наприклад, $p = 0,24$), тоді як для значущих – у вигляді нерівності (наприклад, $p < 0,05$). Додатково функція повертає `BF10` – фактор Байєса, який кількісно характеризує силу доказів на користь

альтернативної гіпотези про наявність кореляції; великі значення BF_{10} вказують на сильну підтримку гіпотези про наявність зв'язку. Показник $power$ (потужність тесту) відображає ймовірність виявити ефект (кореляцію) за умови, що він дійсно існує; значення, близькі до 1, свідчать про високу ймовірність виявлення істотного зв'язку і, відповідно, про надійність проведеного тестування.

Таким чином, застосування коефіцієнта кореляції Спірмена у поєднанні з функцією `pairwise_corr` бібліотеки `pingouin` дозволяє не лише встановити наявність і силу зв'язку між часовими рядами детекцій BirdNET та акустичних індексів, але й кількісно оцінити ступінь статистичної значущості цих зв'язків, довірчі інтервали, частку поясненої варіації та надійність отриманих результатів, що є важливим для коректної інтерпретації екологічних висновків.



РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Автоматизований аудіозапис

Акустичні дані для подальшого аналізу були отримані в умовах приватної житлової забудови у місті Вінниця (51.09°N, 28.43°E). Обрана локація характеризується типовим міським звуковим середовищем, у якому поєднуються біофонічні сигнали (вокалізації птахів, комах та інші природні звуки) та антропогенні джерела шуму, притаманні житловим мікрорайонам (побутові шуми, рух транспорту, фонові звуки міської інфраструктури). Такий вибір місця є важливим для дослідження стану біорізноманіття у міських умовах, де інтенсивність біофонії та рівень антропофонії суттєво змінюються протягом доби. Для реєстрації аудіоданих використовувався портативний рекордер, встановлений на балконі приватного будинку на висоті приблизно 2,5–3 м над рівнем ґрунту. Це дозволяло зменшити вплив приземних шумів і забезпечувало кращу зону прийому звукових сигналів. Запис здійснювався у форматі монофонічного звуку з частотою дискретизації 96 кГц та глибиною 24 біти, що забезпечувало достатню спектральну роздільність для подальшого біоакустичного аналізу та можливість коректної роботи алгоритмів автоматичної детекції.

Записи проводилися відповідно до фіксованого добового графіка: з 21:00 вечора до 11:00 ранку, що дозволяло охопити нічний період з мінімальною антропофонією та вранішній пік вокалізації птахів. Один цикл запису тривав 10 хвилин, після чого автоматично встановлювалася 20-хвилинна пауза, що давало змогу уникнути надмірного накопичення даних та забезпечувало репрезентативність вибірки впродовж ночі та ранку. У деякі дні записи продовжувалися залежно від технічних умов або стабільності живлення пристрою.

Моніторинг проводився у період з 12 серпня 2025 року до 4 вересня 2025 року. Загалом було отримано 644 аудіофайли тривалістю 10 хвилин, що

становить понад 107 годин записів. Такий обсяг даних забезпечив достатню щільність акустичної інформації для подальшого визначення біофонічної активності, проведення автоматичної детекції видів за допомогою BirdNET та розрахунку акустичних індексів.

3.2 Автоматична класифікація видів за допомогою BirdNET

Для автоматизованої класифікації вокалізацій птахів у межах проведеного акустичного моніторингу була використана нейромережева модель BirdNET, побудована на основі глибокої згорткової архітектури та орієнтована на аналіз спектрограм авіальних сигналів [21]. Оброблення даних здійснювалось через Python-бібліотеку birdnetlib, яка забезпечує програмний доступ до BirdNET-Analyzer та BirdNET-Lite. Нейромережа працює з короткими часовими вікнами (приблизно 3 секунди), для кожного з яких формуються мел-спектрограми та подальші ймовірнісні оцінки належності до одного або кількох видів. Для кожного аудіофрагмента модель повертає список детектованих видів та відповідні значення довіри (confidence), що знаходяться у діапазоні від 0.1 до 0.99. У дослідженні застосовувалися стандартні параметри BirdNET ($\text{min_conf} = 0.1$, $\text{sensitivity} = 1$), оскільки вплив зміни цих налаштувань на точність класифікації поки що досліджений недостатньо [22].

Аби уникнути попереднього виключення видів, модель обробляла всі записані фрагменти без використання глобальних карт розповсюдження eBird [23]. Однак на етапі інтерпретації даних було застосоване обмеження списку видів з урахуванням екологічних умов дослідження. Для цього BirdNET отримував: географічні координати місця запису (м. Вінниця), дати та часовий інтервал доби, у які проводилися аудіореєстрації.

Урахування просторових та сезонних характеристик дозволяє моделі звужувати множину потенційних видів до тих, що найбільш ймовірні для даної

території у вибраний період. Такий підхід зменшує ймовірність хибнопозитивних класифікацій та підвищує коректність подальшої екологічної інтерпретації. Усі аудіофайли оброблялися за допомогою спеціально створеного Python-скрипту, який аналізував кожний 10-хвилинний запис та зберігав результати у форматі CSV, сумісному з анотаційним форматом Raven Pro. Для кожної детекції зберігались: англійська та наукова назва виду, початковий та кінцевий час вокалізації, значення впевненості та службова мітка BirdNET.

Отримані результати використовувалися для подальшого обчислення показників біорізноманіття, включно зі species richness, relative abundance та індексами різноманіття (Шеннона та Сімпсона), що дозволило перейти від сирих аудіоданих до кількісної оцінки структурних характеристик орнітофауни досліджуваної території.

3.3 Вибір біоакустичних індексів

На основі проведеного літературного огляду та аналізу сучасних підходів есоacoustics для нашого дослідження було обрано вісім біоакустичних індексів, які найбільш часто використовуються у міських та антропогенно трансформованих екосистемах для оцінювання біофонічної активності та загальної структури звукового ландшафту. До набору відібраних показників увійшли: ACI, ADI, AEI, BI, NDSI, H, Hf та Ht. Їхнє застосування дозволяє охопити різні аспекти звукової динаміки — від спектральної різноманітності до оцінки співвідношення природних і антропогенних звуків.

Вибір саме цих індексів обумовлений їхньою високою інформативністю, перевіреною у численних екоакустичних дослідженнях, та здатністю характеризувати як біофонічні, так і антропофонічні складові звукового середовища. У міських умовах, де рівень шумового забруднення суттєво впливає на біоакустичні процеси, використання комплексного набору індексів є

необхідним для отримання надійної та екологічно валідної оцінки стану біорізноманіття.

Кожен 10-хвилинний аудіозапис було розділено на однихвилинні фрагменти, для яких окремо обчислювалися всі відібрані індекси. Надалі індекси усереднювалися для кожного запису, що дозволяло отримати репрезентативні значення, незалежні від короточасних шумів або локальних піків біофонії. Такий підхід широко застосовується в есоакустиці, оскільки хвилинний інтервал забезпечує баланс між часовою деталізацією та стабільністю показників. Обчислення індексів здійснювалось за допомогою Python-модуля Acoustic_Indices [24], який реалізує стандартні формули ACI, ADI, AEI, BI, NDSI, H, Ht та Hf. У дослідженні використовувалося значення FFT = 1024, що відповідає частотній роздільності 46.875 Гц та часовій роздільності 0.0213 с, що є типовими параметрами для екоакустичного аналізу й забезпечують достатню точність оцінки спектральних характеристик.

3.4 Часові ряди автоматичного виявлення видів за допомогою BirdNET та часові ряди акустичних індексів

На основі результатів автоматичного розпізнавання вокалізацій птахів за допомогою нейромережі BirdNET були сформовані часові ряди виявлень видів. Для кожного аудіофайла, що відповідає окремому 10-хвилинному інтервалу запису, фіксувалися дата та точний час його отримання. Після цього для кожного інтервалу визначалися два основні показники: кількість зареєстрованих видів (num_species) та загальна кількість вокалізацій (num_songs), тобто сумарне число окремих детекцій BirdNET незалежно від виду. Таким чином, часова структура даних дозволяла відстежувати зміну біоакустичної активності протягом усього періоду спостережень. Паралельно з цим для кожного аудіофайла обчислювалися значення відібраних восьми біоакустичних індексів: ACI, ADI, AEI, BI, NDSI, H, Hf та Ht. Кожний з цих індексів відображає окремий аспект акустичної структури

записів — від спектральної різноманітності до співвідношення біофонії та антропофонії. У результаті було сформовано вісім окремих часових рядів, де кожна точка відповідала одному 10-хвилинному запису. Таким чином, у дослідженні було отримано два взаємопов'язані блоки часових даних: часові ряди автоматичного виявлення видів за допомогою BirdNET, які відображають зміну видового багатства та вокальної активності і часові ряди акустичних індексів, що характеризують спектральні та структурні параметри звукового ландшафту.

Ці набори даних є основою для подальшого статистичного аналізу, спрямованого на визначення зв'язків між біофонічними подіями та акустичними характеристиками середовища, зокрема через обчислення кореляційних залежностей та аналіз часових патернів.

3.4.1 Часові ряди біоакустичних індексів

На рис. 3.4.1 наведено часові ряди основних біоакустичних індексів (ACI, ADI, AEI, BI, NDSI, H), усереднених за 10-хвилинними інтервалами упродовж доби з 22:00 до 12:00 наступного дня. Кожна точка відображає середнє значення індексу для відповідного інтервалу, а вертикальні «вуса» показують стандартне відхилення між 1-хвилинними фрагментами.

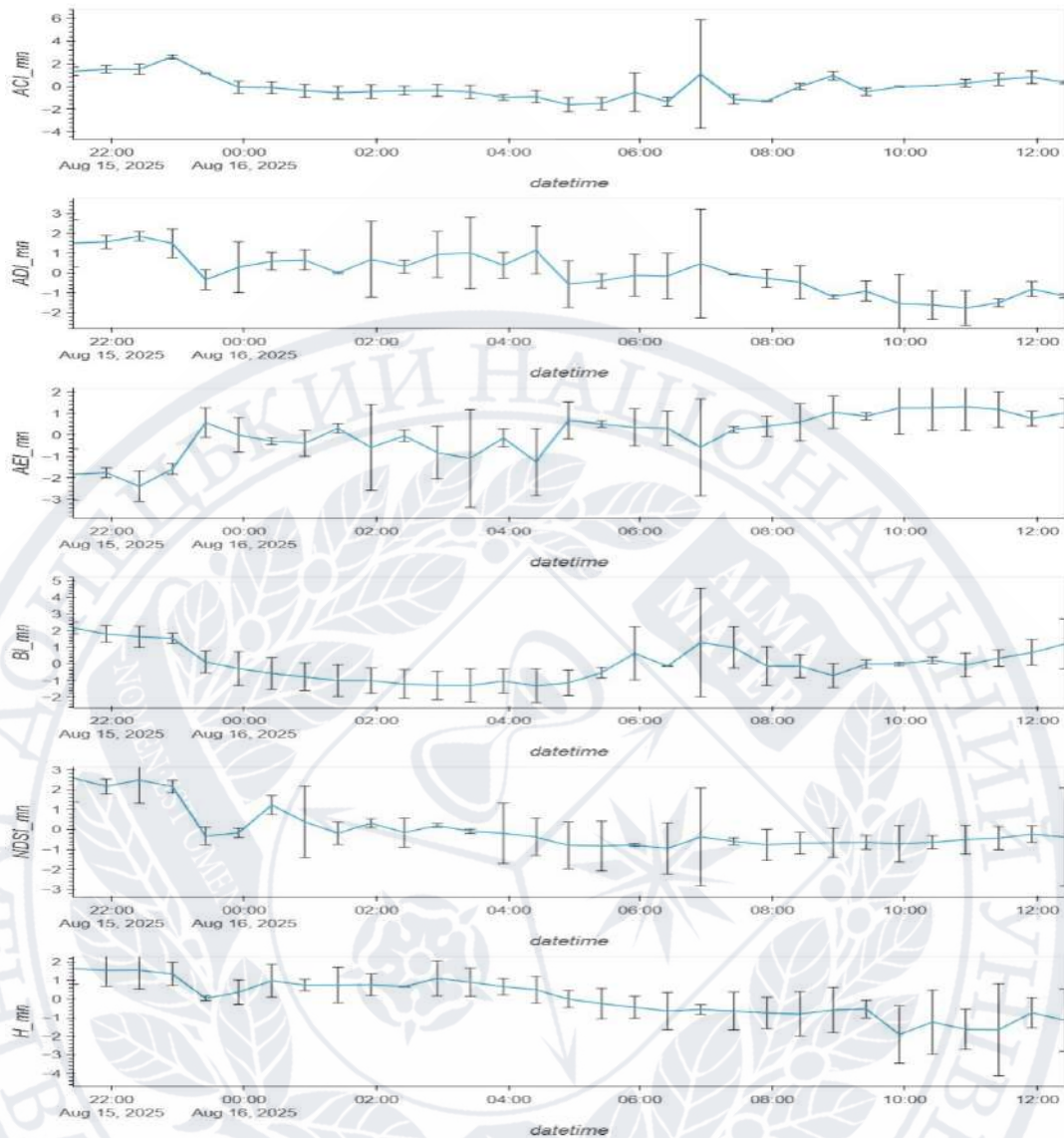


Рис. 3.4.1 – Часові ряди біоакустичних індексів (ACI, ADI, AEI, BI, NDSI, H) за одну добу.

Загалом спостерігається: ACI та BI мають найвищі значення у вечірній період (близько 22:00), після чого знижуються вночі й знову демонструють виражені піки в часовому інтервалі приблизно 06:00–08:00. Це відповідає інтенсивнішій біофонічній активності, зокрема ранковому хору птахів, коли зростає кількість коротких, динамічних вокалізацій. ADI та AEI змінюються більш плавно, відображаючи відносну стабільність спектральної структури звукового ландшафту. Нічний період характеризується помірними коливаннями

цих індексів, тоді як у ранкові години спостерігається тенденція до збільшення значень AEI та локальних максимумів ADI, що пов'язано з появою нових біофонічних компонент. NDSI та H демонструють, переважно, обернену тенденцію відносно ACI та BI. У години підвищеної біоактивності (ранковий період) значення NDSI зростають, що свідчить про домінування біофонії над антропофонією, тоді як акустична ентропія H дещо знижується, що пов'язано зі зростанням впорядкованості сигналів і появою більш структурованих вокалізацій.

3.4.2 Часові ряди індексів біорізноманіття

На рис. 3.4.2 подано часові ряди кількості виявлених видів птахів (num_species) та загальної кількості зафіксованих вокалізацій (num_songs) упродовж тієї самої доби. Обидва показники мають подібну динаміку: у нічний час активність низька: кількість видів не перевищує 1–2, кількість вокалізацій залишається незначною, а починаючи приблизно з 05:00 спостерігається різке зростання як кількості видів, так і кількості співів, що досягає максимуму в інтервалі близько 06:30–07:30. Вже після 09:00 обидва показники поступово знижуються, що відповідає завершенню ранкової активності птахів. Таким чином, часові ряди num_species та num_songs чітко відображають характерну для орнітофауни добову динаміку з вираженим ранковим піком.

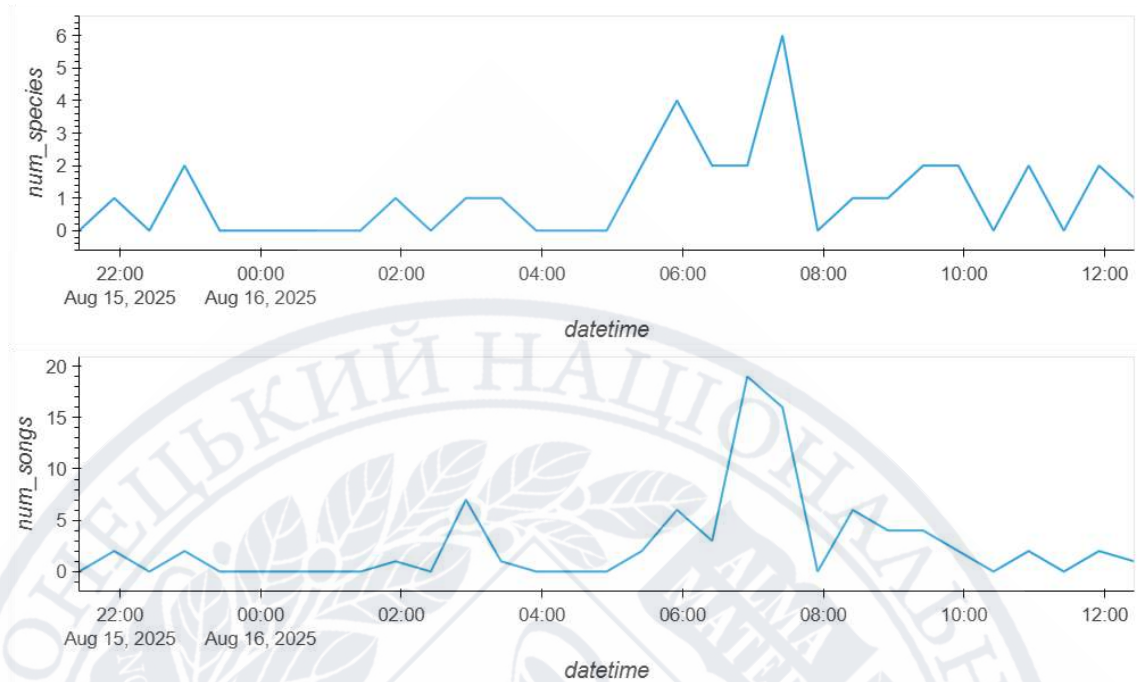


Рис. 3.4.2 – Часові ряди кількості виявлених видів (*num_species*) та кількості вокалізацій (*num_songs*).

3.4.3 Порівняння часових рядів біорізноманіття та акустичних індексів

На рис. 3.4.3 наведено нормалізовані (масштабовані до єдиного діапазону) часові ряди всіх показників: *num_species*, *num_songs*, *ACI*, *ADI*, *AEI*, *BI*, *NDSI* та *H*. Нормування дозволило безпосередньо порівнювати форму кривих у єдиному масштабі.

Візуальний аналіз показує, що *ACI*, *BI* та частково *AEI* найбільш щільно повторюють форму кривих *num_species* та *num_songs*, особливо в інтервалі 05:00–08:00. Це свідчить про високу узгодженість між біоакустичними характеристиками складності сигналу й показниками біорізноманіття, що відображають видове багатство та кількість вокалізацій. *ADI* демонструє проміжну поведінку, тоді як *NDSI* та *H* мають протилежну тенденцію: у години пікової біоактивності *NDSI* зростає, тоді як *H* знижується, що узгоджується з

інтерпретацією цих індексів як показників балансу біофонії/антропофонії та ступеня впорядкованості звукового середовища.

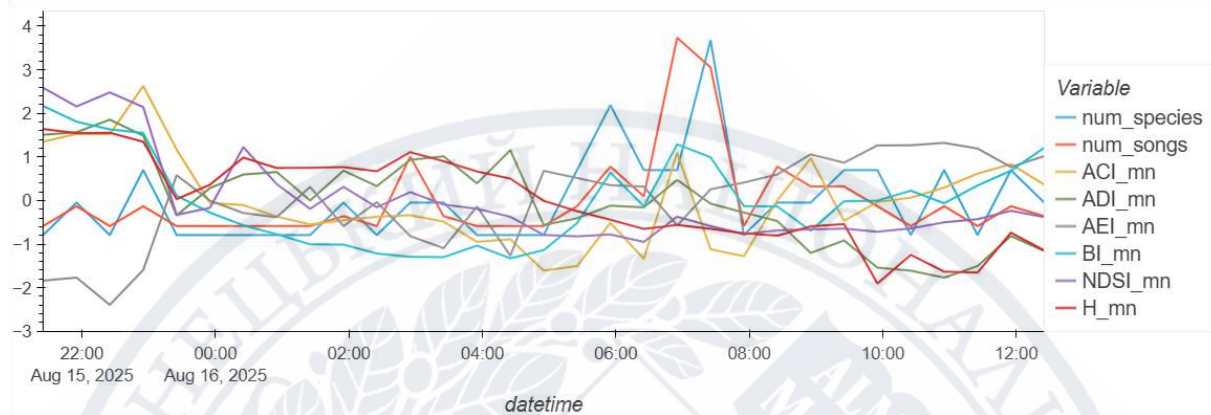


Рис. 3.4.3 – Нормалізовані часові ряди показників біорізноманіття та акустичних індексів.

3.4.4 Спектрограми 600-секундних записів

На рис. 3.4.4 наведено спектрограми двох 600-секундних (10-хвилинних) записів, виконаних у нічний та ранковий періоди. По осі X відкладено час запису (у секундах), по осі Y — частоту сигналу (Гц), кольорова шкала відображає рівень енергії сигналу в децибелах (dB), де теплі кольори відповідають зонам підвищеної інтенсивності, а холодні — мал шумовим ділянкам.

При візуальному порівнянні спектрограм спостерігається, що у вечірніх та нічних записах домінує відносно стабільний широкосмуговий фон у середньочастотному діапазоні, який може відповідати безперервному «хору» комах та фоновим міським шумам. У ранкових записах на цьому фоні з'являються численні імпульсні, добре структуровані елементи у середньо- та високочастотній області, що відповідають вокалізаціям птахів. У подальші години інтенсивність біофонії зменшується, спектрограма стає більш однорідною, а внесок антропогенних шумів відносно зростає.

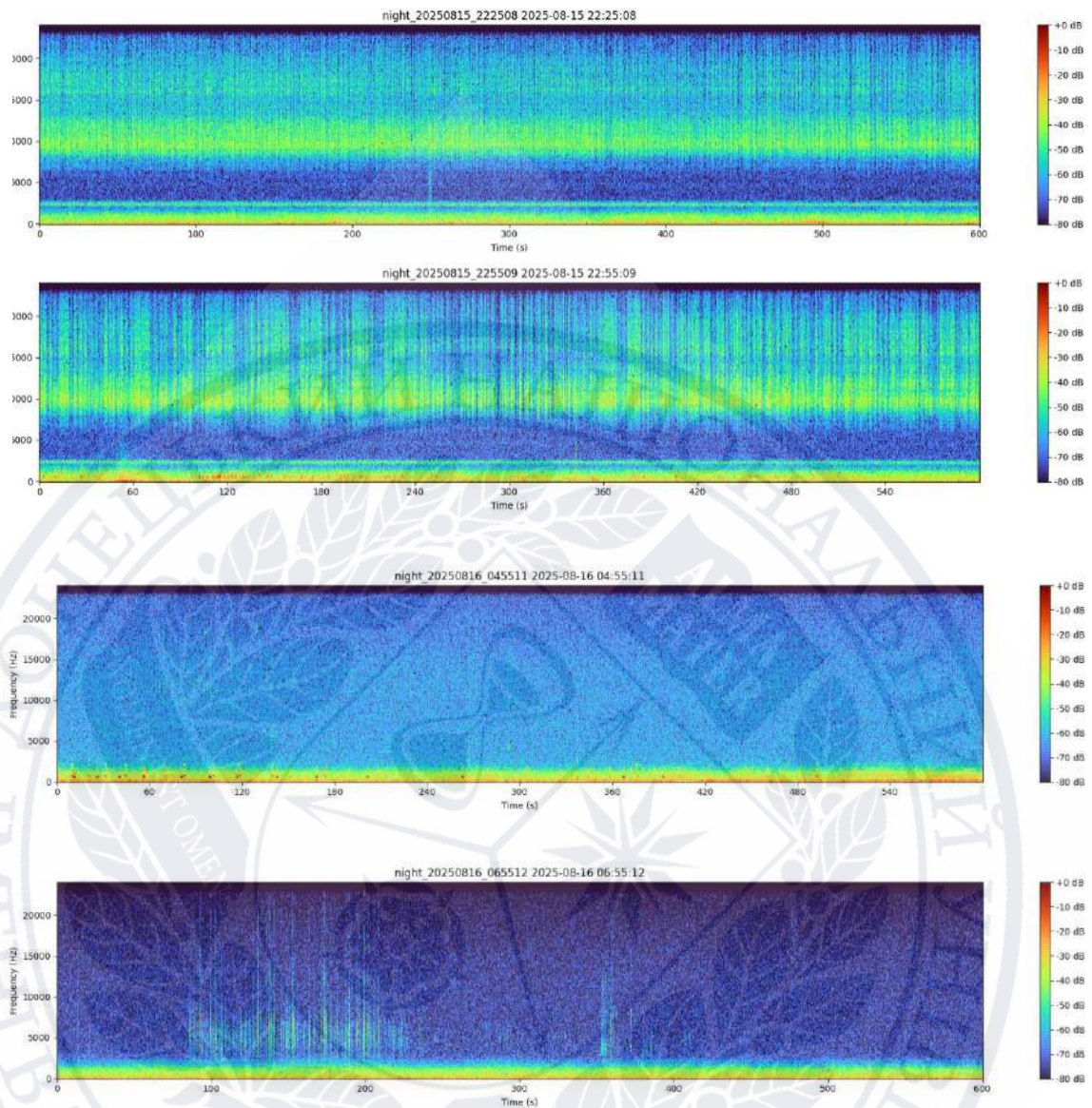


Рис. 3.4.4 – Спектрограми двох 600-секундних записів (нічний та ранковий періоди).

3.5 Результати повного набору даних (місяць реєстрацій)

На рис. 3.5 наведено часові ряди кількості виявлених видів птахів (num_species) та загальної кількості вокалізацій (num_songs) за повний період спостережень (близько одного місяця). Кожна точка відповідає одному 10-хвилинному запису. Видно, що біоакустична активність не є сталою впродовж усього періоду: для окремих діб спостерігаються виражені піки як за кількістю

видів, так і за кількістю вокалізацій, тоді як в інші ночі активність залишається відносно низькою. Максимальні значення `num_species` сягають 8–9 видів за 10 хвилин, `num_songs` — понад 100 вокалізацій, що свідчить про наявність окремих періодів інтенсивного співу (ймовірно, пов'язаних із погодними умовами, фазами сезону чи локальними подіями у середовищі).

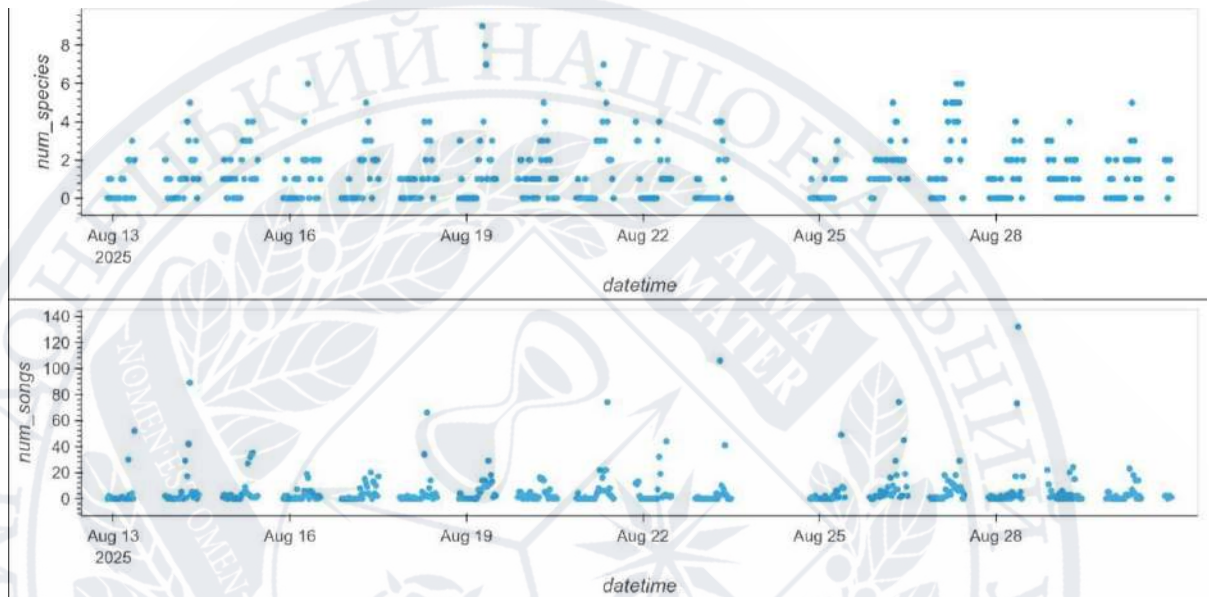


Рис. 3.5 – Часові ряди кількості виявлених видів (`num_species`) та кількості вокалізацій (`num_songs`) за повний місяць спостережень.

На рис. 3.5.2 подано часові ряди нормалізованих біоакустичних індексів (`ACI`, `ADI`, `AEI`, `BI`, `NDSI`, `H` та ін.), розрахованих для тих самих 10-хвилинних інтервалів. Добово-періодична структура, виявлена раніше на прикладі однієї доби, добре проглядається й у повному масиві даних: для більшості індексів видно регулярні «грони» точок, що відповідають нічним/ранковим сесіям запису, із повторюваними патернами зміни значень.

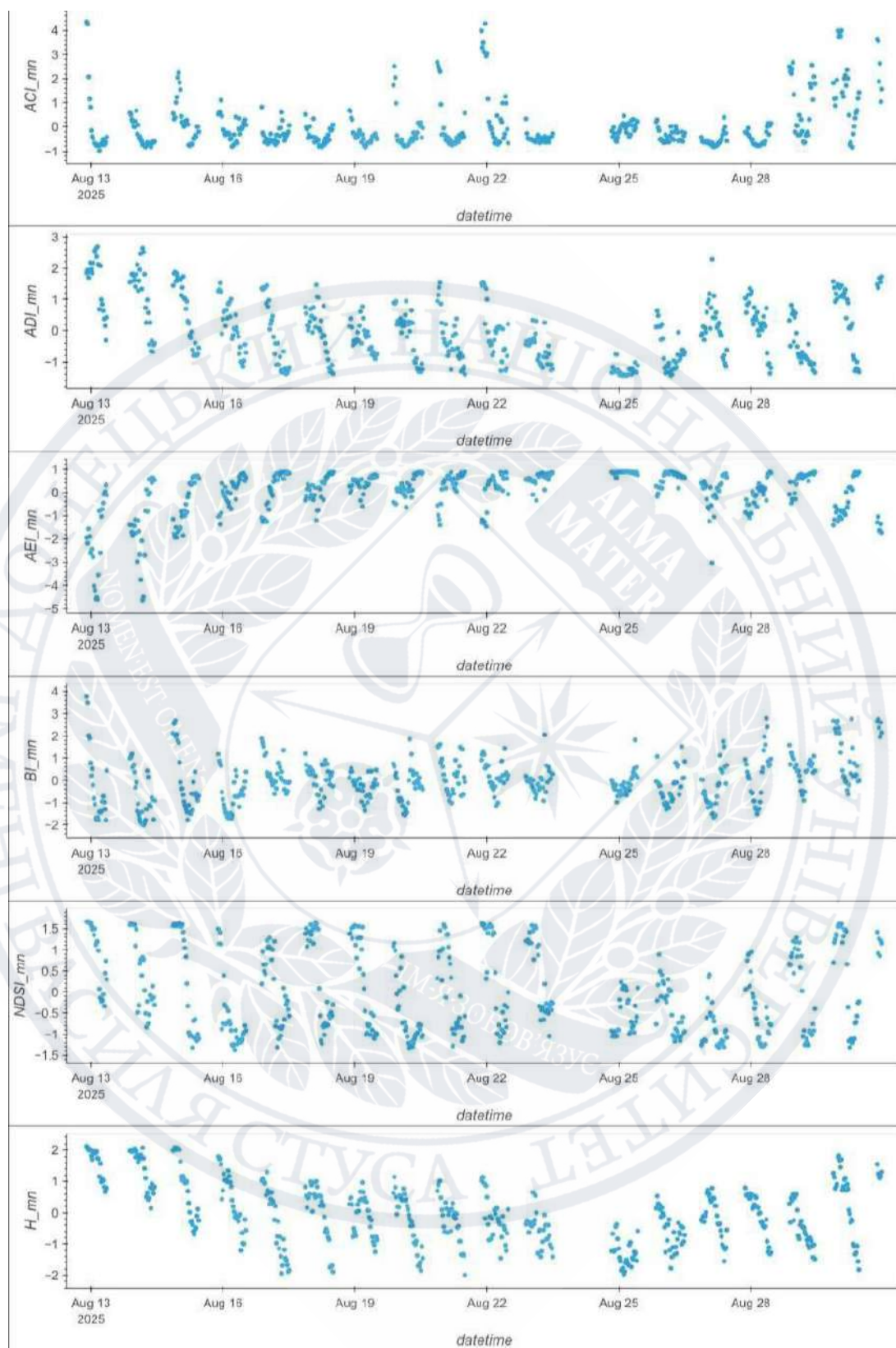


Рис. 3.5.2 – Часові ряди нормалізованих біоакустичних індексів (ACI, ADI, AEI, BI, NDSI, H тощо) за повний місяць спостережень.

При візуальному порівнянні часових рядів видно, що зв'язок між показниками біорізноманіття (*num_species*, *num_songs*) та акустичними індексами залежить від часу доби. У ранкові години, коли в межах однієї доби спостерігаються піки *num_species* та *num_songs*, значення ACI та BI також різко зростають; точки на графіках утворюють узгоджені «сплески» в одних і тих самих часових позиціях. В цей період візуальна кореляція між показниками біорізноманіття й індексами складності/біофонії є найбільш вираженою. У глибокий нічний період більшість значень *num_species* та *num_songs* залишаються близькими до нуля, а варіація індексів зумовлена переважно фоновими компонентами (комахи, віддалені техногенні шуми). На цьому відрізку узгодженість між біорізноманіттям та індексами послаблюється: зміни ACI, ADI, AEI, NDSI й H не завжди супроводжуються суттєвою зміною кількості видів чи вокалізацій. У денні та пізньоранішні години, коли активність птахів поступово спадає, частина індексів ще демонструє інерційні зміни (особливо H та NDSI), тоді як *num_species* та *num_songs* вже зменшуються до низьких значень, що також послаблює візуальну кореляцію.

За повний місячний період найкращу візуальну відповідність показникам *num_species* та *num_songs* демонструють індекси ACI (Acoustic Complexity Index) та BI (Bioacoustic Index): у більшості діб локальні максимуми цих індексів збігаються у часі з піками кількості видів і співів. Це узгоджується з їхнім змістовим наповненням: ACI чутливий до швидких змін амплітуди та великої кількості коротких вокалізацій, тоді як BI відображає інтенсивність біофонії в «пташиному» частотному діапазоні. AEI (Acoustic Evenness Index) у багатьох випадках повторює загальний ритм змін *num_species/num_songs*, відображаючи зміни нерівномірності розподілу енергії між частотними смугами. ADI демонструє проміжну поведінку: у періоди сильної біоактивності його значення змінюються синхронно з *num_species* та *num_songs*, але в «тихих» інтервали індекс може варіювати під впливом інсектного фону та інших компонентів звукового

середовища. Індeksi NDSI та H, своєю чергою, переважно доповнюють картину: NDSI зростає під час зростання внеску біофонії порівняно з антропофонією, тоді як H (акустична ентропія) зменшується в години добре структурованих вокалізацій. Вони описують характер звукового поля (баланс біофонії/антропофонії та ступінь впорядкованості) і лише опосередковано пов'язані з кількістю видів та співів.

Отже, у масштабі цілого місяця ACI та BI є найбільш інформативними індексами для відображення динаміки пташиної активності, тоді як AEI й ADI дають додаткову інформацію про спектральну структуру, а NDSI та H характеризують зміни співвідношення природних і антропогенних джерел звуку та рівень впорядкованості акустичного середовища.

3.5 Кореляційний аналіз часових рядів даних автоматичного виявлення видів.

У цьому підрозділі здійснено кореляційний аналіз часових рядів, отриманих з результатів автоматичного виявлення видів птахів нейромережею BirdNET, та часових рядів біоакустичних індексів. Метою аналізу було оцінити, по-перше, взаємозв'язки між самими акустичними індексами, а по-друге, встановити, наскільки тісно ці індекси пов'язані з показниками біорізноманіття, розрахованими на основі детекцій BirdNET. Кореляції оцінювалися за допомогою коефіцієнта Спірмена, що є придатним для монотонних, але потенційно нелінійних залежностей, та менш чутливим до викидів і відхилення від нормальності розподілу.

3.5.1 Кореляції між біоакустичними індексами

На першому етапі досліджено взаємозв'язки між часовими рядами біоакустичних індексів ACI, ADI, AEI, BI, NDSI, H, Hf та Ht, розрахованими для кожного 10-хвилинного запису ($n = 511$). Для всіх пар індексів обчислено

коефіцієнти кореляції Спірмена з використанням функції `pairwise_corr` бібліотеки `Pingouin`. Матрицю коефіцієнтів r_s подано у вигляді теплової карти (рис. 4.5.1), що дозволяє візуально ідентифікувати групи показників із близькими або протилежними режимами варіації.

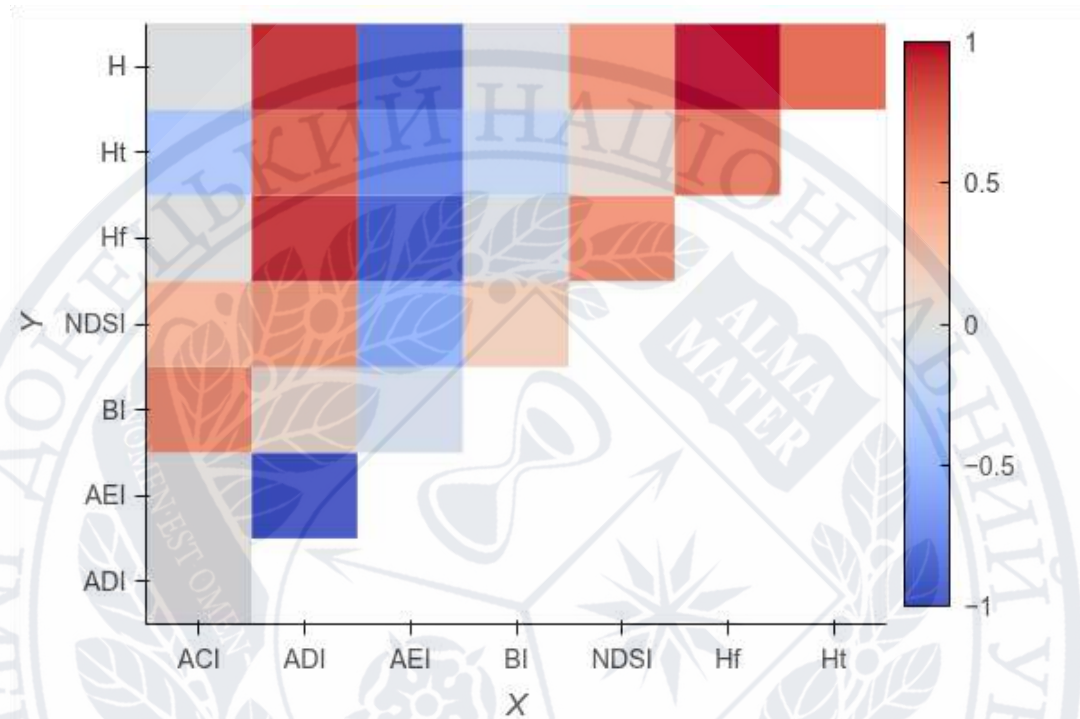


Рис. 3.5.1 – Тепловий кореляційний графік «індекс – індекс» (Spearman між ACI, ADI, AEI, BI, NDSI, H, Hf, Ht).

Аналіз теплової карти та числових значень r_s показав, що частина індексів демонструє практично повну функціональну залежність. Найбільш показовим є зв'язок між ADI та AEI: між ними спостерігається дуже сильна кореляція з протилежним знаком (r_s за модулем близький до 1, $p < 0,001$), що свідчить про те, що ці показники фактично описують один і той самий аспект структури спектра, але в різних шкалах. Зі збільшенням різноманітності спектрального розподілу енергії (ADI) рівномірність (AEI) закономірно зменшується, і навпаки. Сильні позитивні кореляції виявлено також між ADI і ентропійними індексами H та Hf, тоді як AEI, відповідно, має сильні негативні зв'язки з цими ж показниками.

Крім того, між H та H_f спостерігається майже ідеальна позитивна кореляція, а між H та H_t – сильна позитивна кореляція. Це вказує на високий рівень редундантності ентропійних індексів і підтверджує, що вони відображають споріднені риси спектрально-часової структури звукового поля.

Індекс NDSI демонструє помірні позитивні кореляції з H та H_f , що є логічним, оскільки зміни балансу між біофонією та антропофонією впливають на загальну неоднорідність розподілу енергії у спектрі. Пара індексів ACI–BI, навпаки, формує окремий «блок»: між ними фіксується кореляція середньої сили. Обидва індекси чутливі до інтенсивності й варіабельності біофонії у «пташиному» частотному діапазоні, тому їхні часові ряди змінюються узгоджено у періоди підвищеної вокальної активності. Таким чином, кореляційний аналіз засвідчив існування двох основних груп взаємопов'язаних індексів: групи ентропійно-спектральних показників (H , H_f , H_t , ADI, AEI, частково NDSI), та групи «біофонічних» індексів (насамперед ACI та BI). Це необхідно враховувати при подальшому моделюванні, щоб уникнути надмірної мультиколінеарності та дублювання інформації, обмежуючись у кожній групі одним–двома репрезентативними показниками.

3.5.2 Кореляції між показниками біорізноманіття та акустичними індексами

На другому етапі кореляційного аналізу досліджено зв'язок між показниками біорізноманіття, отриманими на основі результатів автоматичного розпізнавання вокалізацій птахів нейромережею BirdNET, та біоакустичними індексами. Як орнітологічні показники розглядалися: кількість зареєстрованих видів птахів за 10-хвилинний інтервал (`num_species`) та загальна кількість зареєстрованих вокалізацій (`num_songs`). Акустичні характеристики були представлені тим самим набором індексів ACI, ADI, AEI, BI, NDSI, H , H_f та H_t , розрахованих для відповідних записів. Для кожної пари «показник

біорізноманіття – акустичний індекс» було обчислено коефіцієнт кореляції Спірмена ($n = 511$) з використанням функції `pairwise_corr`. Для ілюстрації результатів побудовано діаграми розсіювання з нанесеними лінійними трендами для пар «num_species – індекс» та «num_songs – індекс», а також теплову карту кореляцій і графік значень rs з 95 % довірчими інтервалами (рис. 3.5.2–3.5.5).

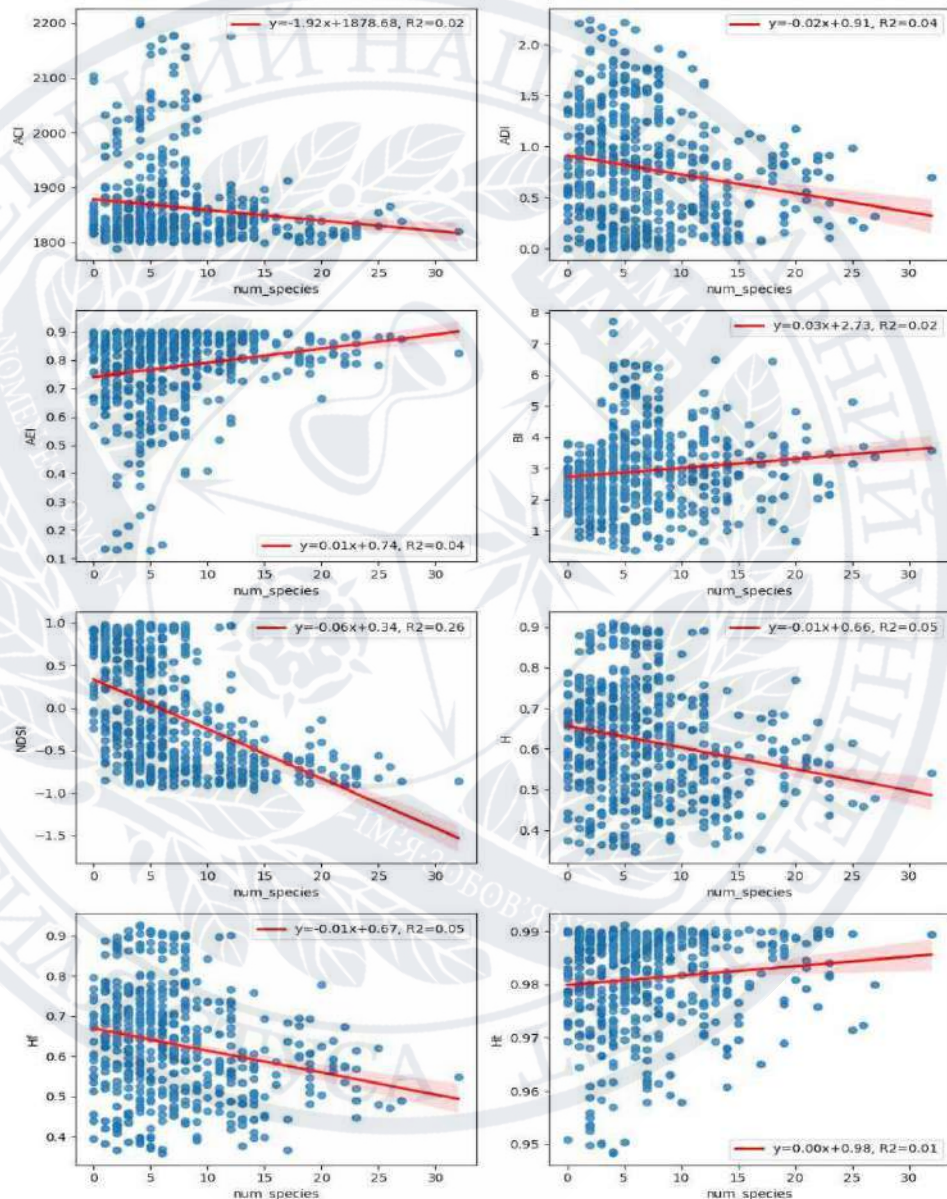


Рис. 3.5.2 – діаграми розсіювання num_species vs кожен індекс з лінійними трендами.

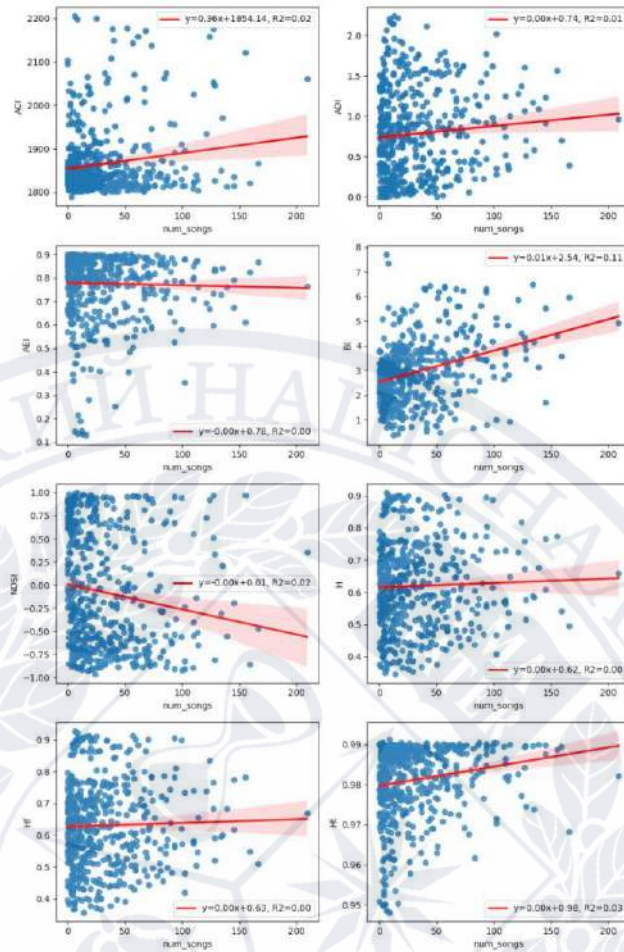


Рис. 3.5.3 – діаграми розсіювання `num_songs` vs кожен індекс.

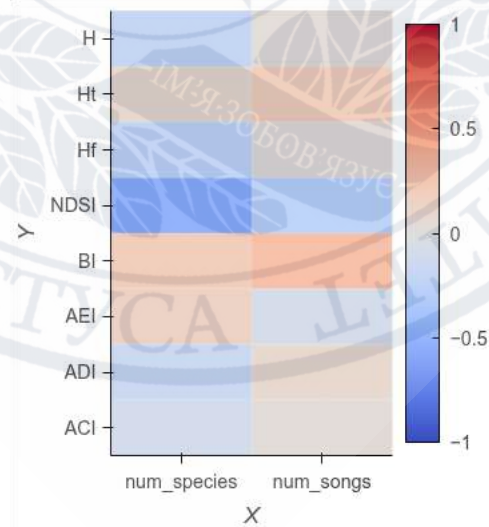


Рис. 3.5.4 – тепловий кореляційний графік (`num_species`, `num_songs`, всі індекси).

У більшості випадків діаграми розсіювання демонструють значну розсіяність точок і лише слабо виражені монотонні тенденції, що свідчить про відсутність чіткої лінійної структури даних. Значення коефіцієнта детермінації R^2 для простих лінійних моделей у переважній більшості пар не перевищують 0,05–0,10, тобто лінійні моделі пояснюють лише невелику частку варіації показників біорізноманіття. Помітніше зростання R^2 (приблизно до 0,26) спостерігається лише для пари «num_species – NDSI». Найбільшу (за модулем) кореляцію з кількістю зареєстрованих видів птахів продемонстрував індекс NDSI: зі збільшенням num_species значення NDSI мають тенденцію зменшуватися (негативний r_s , $p < 0,001$). Позитивна, але слабша кореляція спостерігається між num_species та індексами BI і AEI. Для ACI та ADI виявлено слабку негативну залежність із числом видів, а ентропійні показники H та Hf також демонструють невеликі негативні кореляції; значення r_s для Ht є додатним, але низьким.

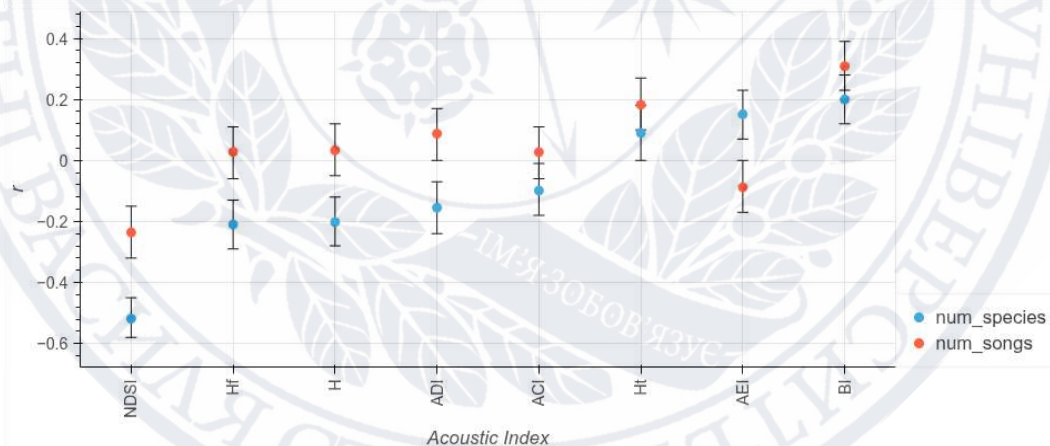


Рис. 3.5.5 – стовпчиковий/лінійний графік значень r_s з 95 % CI для пар «BirdNET-показник – індекс».

Для показника num_songs найвищий зв'язок спостерігається з індексом BI, що узгоджується з інтерпретацією останнього як оцінки інтенсивності біофонії у «пташиному» частотному діапазоні. Індекс NDSI демонструє помірну негативну

кореляцію з num_songs, тоді як Ht має слабку позитивну залежність; кореляції з ACI, ADI, AEI, H та Hf для num_songs виявилися близькими до нуля.

Порівнюючи силу кореляцій для двох орнітологічних показників, можна відзначити, що індекс BI більш чутливий до змін кількості співів (num_songs), ніж до кількості видів (num_species), тоді як NDSI демонструє суттєво вищий (за модулем) зв'язок саме з num_species. Це дозволяє трактувати BI як індикатор інтенсивності вокальної активності, а NDSI – як показник, що відображає зміни видового складу у поєднанні з загальною структурою звукового середовища.

3.5.3 Інтерпретація результатів кореляційного аналізу

Отримані низькі та помірні значення коефіцієнтів Спірмена між показниками біорізноманіття та акустичними індексами свідчать не стільки про відсутність зв'язку, скільки про його складний, багатофакторний характер. Біоакустичні індекси інтегрують внесок усіх джерел звуку у досліджуваному середовищі, тоді як BirdNET реєструє лише вокалізації птахів. За результатами аналізу спектрограм встановлено, що у вечірній та нічний час значну частку акустичного поля формує вокалізація комах (зокрема, «хор» цвіркунів у діапазоні 2–8 кГц), яка істотно впливає на значення ACI, ADI, AEI, BI та NDSI, але не призводить до збільшення кількості зареєстрованих BirdNET видів чи співів. Це призводить до «розмивання» кореляцій між акустичними індексами та орнітологічними показниками. Додатковим чинником є різниця у часовій роздільності: акустичні індекси розраховувалися для 1-хвилинних фрагментів із подальшим усередненням по 10-хвилинних записах, тоді як BirdNET здійснює класифікацію у значно коротших вікнах. Унаслідок цього короткі, інтенсивні вокалізації можуть сильно впливати на значення індексів, але давати невелику кількість BirdNET-детекцій, а велика кількість слабких сигналів – навпаки.

Узагальнюючи результати кореляційного аналізу, можна зробити такі висновки: біоакустичні індекси не можуть розглядатися як прямі замітники класичних орнітологічних показників біорізноманіття, але є корисними непрямыми індикаторами змін структури звукового середовища. Найбільш інформативними з точки зору зв'язку з результатами BirdNET виявилися індекси BI (для інтенсивності вокалізацій) та NDSI (для змін видового складу). Ентропійні індекси та індекси спектральної різноманітності (ADI, AEI, H, Hf, Ht) є сильно взаємозалежними, тому доцільно обмежити їх використання одним–двома репрезентативними показниками. Для підвищення прогностичної здатності моделей доцільно застосовувати комбіновані підходи, що враховують одночасно кілька акустичних індексів та додаткові екологічні й просторові змінні (час доби, погодні умови, характер забудови, відстань до джерел антропогенного шуму тощо).

3.6 Обговорення отриманих результатів

У роботі було поєднано два підходи до оцінювання біорізноманіття птахів у міському середовищі: автоматичне розпізнавання вокалізацій за допомогою нейромережі BirdNET та розрахунок набору біоакустичних індексів (ACI, ADI, AEI, BI, NDSI, H, Hf, Ht) на основі записів пасивного акустичного моніторингу. Добові часові ряди показників BirdNET (кількість видів і кількість вокалізацій) продемонстрували очікувану структуру з вираженим ранковим піком активності птахів, що відповідає класичним уявленням про добову динаміку орнітофонії. Найбільші значення кількості видів (num_species) та кількості вокалізацій (num_songs) фіксувалися в інтервалі приблизно 06:00–08:00, тоді як у нічні години активність залишалася мінімальною.

Часові ряди біоакустичних індексів засвідчили, що найбільш чутливими до змін біофонії виявилися індекси ACI та BI. У періоди інтенсивного співу птахів вони демонстрували різкі зростання, які добре узгоджувалися в часі з піками

num_species та num_songs. Це підтверджує їхню інтерпретацію як індексів, що реагують на велику кількість коротких, динамічних вокалізацій у «пташиному» частотному діапазоні. AEI та ADI відображали більш фонові зміни спектральної структури сигналу й були менш однозначно пов'язані з показниками BirdNET. Індеси NDSI та H характеризували співвідношення біофонії й антропофонії та рівень впорядкованості звукового середовища, тому демонстрували радше доповнювальну, ніж безпосередньо «орнітологічну» поведінку.

Кореляційний аналіз за коефіцієнтом Спірмена показав, що зв'язок між біоакустичними індексами та показниками BirdNET у масштабі місячного набору даних переважно слабкий або помірний. Найвищий (за модулем) зв'язок із кількістю видів (num_species) продемонстрував індекс NDSI (негативна кореляція), тоді як для кількості вокалізацій (num_songs) найбільш інформативним виявився BI. Ентропійні індекси H, Hf, Ht та індекси спектральної різноманітності ADI та AEI утворюють сильно взаємопов'язаний блок показників з високою редундантністю: між ними спостерігаються дуже сильні кореляції, що свідчить про дублювання інформації та обмежену додаткову користь від одночасного використання всіх цих індексів.

Отримані результати означають, що акустичні індекси не можуть розглядатися як прямий заміник автоматизованої або експертної оцінки видового багатства, але можуть слугувати корисними непрямыми індикаторами змін структури звукового середовища. Зокрема, BI є доцільним для оцінювання інтенсивності вокальної активності птахів, тоді як NDSI – для діагностики зміни співвідношення біофонії та антропофонії, яке опосередковано пов'язане зі станом орнітофауни у міському середовищі.

3.6.1 Роль пасивного акустичного моніторингу та автоматизованого аналізу

Отримані дані підтверджують важливу роль пасивного акустичного моніторингу як інструмента багатодобового спостереження за біорізноманіттям у міських умовах. Використання автономного рекордера дозволило накопичити понад 100 годин записів без постійної присутності дослідника, що принципово недосяжно для традиційних візуальних обліків. Наявність повного акустичного архіву дає можливість повторного аналізу за допомогою нових алгоритмів у майбутньому та забезпечує прозорість і відтворюваність дослідження. Автоматизована класифікація вокалізацій за допомогою BirdNET значно скорочує витрати часу на обробку матеріалу та дозволяє перейти від «ручного» прослуховування до масового аналізу даних. У контексті міських досліджень це відкриває можливість розгортання стаціонарних акустичних станцій, які забезпечуватимуть безперервний моніторинг орнітофауни в реальному часі. Паралельний розрахунок біоакустичних індексів із використанням бібліотеки Acoustic_Indices створює додатковий «шар» інформації про структуру саундскейпу, включно з внеском комах, техногенних шумів та геофонії.

У сукупності це формує гнучку й масштабовану методологію для урбаністичних досліджень біорізноманіття: BirdNET забезпечує видові списки й кількісні показники, тоді як акустичні індекси дають інтегральні метрики стану звукового середовища, що є важливим для оцінки екологічної якості міських територій та планування природоохоронних заходів.

3.6.2 Проблематика та обмеження дослідження

Разом з тим результати висвітлили низку методичних та практичних проблем, притаманних екоакустичним дослідженням у міському середовищі. По-перше, біоакустичні індекси інтегрують внесок усіх джерел звуку, тоді як

BirdNET реєструє лише вокалізації птахів. У досліджуваній локації значну частку нічного акустичного поля формували вокалізації комах у діапазоні 2–8 кГц, а також фонові міські шуми. Ці компоненти суттєво впливали на значення ACI, ADI, AEI, BI та NDSI, але не відображалися у показниках num_species та num_songs. Унаслідок цього кореляції між індексами та показниками BirdNET «розмивалися», особливо в години низької пташиної активності. По-друге, дослідження обмежене однією локацією з приватною забудовою та відносно коротким періодом спостережень (кінець літа – початок осені). Це ускладнює екстраполяцію результатів на інші типи міських біотопів (парки, промислові зони, прибережні території) та інші сезони року, де звуковий ландшафт і структура орнітофауни можуть суттєво відрізнятися. Точність BirdNET залежить від якості навчальних даних, умов запису та налаштувань параметрів (min_conf, чутливість, використання геолокації). У роботі було використано стандартні параметри, а валідація результатів із залученням експерта-орнітолога не проводилася для повного масиву даних. Це означає, що частина детекцій може бути хибнопозитивною або, навпаки, деякі види могли залишитися не виявленими. У разі складних нелінійних взаємодій (наприклад, порогових ефектів, насичення, взаємодії кількох індексів одночасно) прості парні кореляції можуть недооцінювати істинний рівень зв'язку між біоакустичними індексами та показниками біорізноманіття.

Усі ці фактори слід враховувати при інтерпретації результатів: виявлені слабкі та помірні кореляції не свідчать про повну непридатність акустичних індексів, а радше про необхідність обережного застосування та більш складних аналітичних підходів.

3.6.3 Перспективи подальших досліджень

Отримані результати окреслюють кілька перспективних напрямів подальшої роботи:

- Розширення просторово-часового охоплення. Доцільно провести аналогічні вимірювання в інших типах міських біотопів (парки, сквери, прибережні зони, промислові й транспортні коридори) та в різні сезони року. Це дозволить оцінити стабільність зв'язків між акустичними індексами та показниками BirdNET у ширшому діапазоні умов.
- Інтеграція експертної валідації. Для частини записів варто виконати ручну анотацію вокалізацій із залученням фахівця-орнітолога. Це дасть змогу кількісно оцінити точність BirdNET у конкретному середовищі, скоригувати параметри моделі (min_conf, чутливість, фільтри видів) та сформувати еталонний датасет для порівняння з індексами.
- Поглиблений аналіз компонентів саундскейпу. Перспективним є автоматичне розділення записів на компоненти біофонії, антропофонії та геофонії з використанням додаткових моделей машинного навчання. Це дозволить «очищати» індекси від небажаних шумів і будувати окремі індекси для біофонії, що потенційно посилить їхній зв'язок із видовим різноманіттям птахів.
- Використання багатовимірних моделей. Замість аналізу простих парних кореляцій доцільно застосовувати регресійні моделі, узагальнені адитивні моделі, Random Forest, градієнтний бустинг тощо, які здатні враховувати нелінійні й комбіновані ефекти кількох індексів одночасно, а також додаткові предиктори (час доби, температура, метеоумови, відстань до дороги тощо).
- Інтеграція в інформаційні системи. Наступним кроком може стати розробка веб-сервісу або програмного модуля, який автоматично оброблятиме записи, виконуватиме BirdNET-аналіз, розрахунок акустичних індексів, візуалізацію часових рядів та базову аналітику для кінцевого користувача.

У підсумку, результати цієї роботи підтверджують перспективність поєднання пасивного акустичного моніторингу, нейромережевої детекції

BirdNET та біоакустичних індексів для оцінювання стану біорізноманіття у міському середовищі. Одночасно вони демонструють, що для практичного впровадження такого підходу потрібні подальші дослідження, спрямовані на підвищення точності, інтерпретованості та стійкості отримуваних показників у широкому спектрі акустичних та екологічних умов.



ВИСНОВКИ

1. Сформовано та реалізовано комплексний підхід до екоакустичного моніторингу міського середовища, автоматичну детекцію вокалізацій птахів нейромережею BirdNET та розрахунок набору біоакустичних індексів (ACI, ADI, AEI, BI, NDSI, H, Hf, Ht). Поставлена мета дослідження досягнута, усі основні завдання виконані.
2. Автоматичне розпізнавання вокалізацій за допомогою BirdNET (через бібліотеку birdnetlib) дало змогу для кожного 10-хвилинного інтервалу отримати показники кількості зареєстрованих видів (num_species) та кількості вокалізацій (num_songs). Часові ряди цих показників виявили очікувану добову структуру з вираженим ранковим максимумом («ранковий хор») та низькою нічною активністю.
3. Розрахунок біоакустичних індексів за допомогою бібліотеки Acoustic_Indices показав наявність двох основних груп інформативних показників: спектрально-ентропійні (ADI, AEI, H, Hf, Ht, частково NDSI), що відображають загальну структуру звукового поля та «біофонічні» (передусім ACI та BI), більш чутливі до інтенсивності пташиних вокалізацій.
4. Добові патерни ACI та BI добре узгоджуються з піками активності птахів, тоді як ентропійні індекси значною мірою реагують також на фон комах та міські шуми.
5. Кореляційний аналіз за коефіцієнтом Спірмена виявив переважно слабкі та помірні зв'язки між біоакустичними індексами та показниками BirdNET. Найбільш інформативними індексами виявилися BI (для кількості вокалізацій, num_songs) та NDSI (для кількості видів, num_species), тоді як ентропійні та індекси різноманіття (ADI, AEI, H, Hf, Ht) лише частково узгоджуються з динамікою пташиного різноманіття.
6. Виявлено високу редундантність між окремими біоакустичними індексами, зокрема між ADI та AEI, H та Hf, H та Ht, що свідчить про дублювання

інформації в наборі показників. Це означає, що для практичного застосування доцільно обмежуватися одним–двома репрезентативними індексами з кожної групи, щоб уникати мультиколінеарності та спростити інтерпретацію результатів. Показано, що в умовах міського середовища акустичні індекси слід розглядати як непрямі індикатори стану біорізноманіття, які чутливі до всієї структури саундскейпу (біофонія, антропофонія, вокалізації комах), а не лише до птахів. Запропонований підхід (пасивний моніторинг + BirdNET + акустичні індекси) є перспективною основою для побудови автоматизованих систем довгострокового моніторингу міських екосистем, а подальші дослідження мають бути спрямовані на розширення просторово-часового охоплення, валідацію результатів та розробку комбінованих моделей на основі кількох індексів та додаткових екологічних змінних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. World Bank. Advancing Biodiversity Conservation: Data-Driven Insights for Global Sustainability and Resilience // World Bank Research & Outlook Brief. – 2023. – Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://www.worldbank.org/en/research/brief/biodiversity>. – Назва з екрану.
2. Sugai L. M., Silva T. S., Ribeiro J. Jr., Llusia D. Passive acoustic monitoring and landscape ecology: Ecological metrics and trends // Acta Acustica. – 2019. – Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://thecela.org/wp-content/uploads/LRR12-SELECTING-APPROPRIATE-ACOUSTIC-INDICES-FOR-BIODIVERSITY-ASSESSMENTS-IN-DIFFERENT-ACOUSTIC-ENVIRONMENTS.pdf>. – Назва з екрану.
3. Pijanowski B. C., et al. Soundscape Ecology: The Science of Sound in the Landscape // BioScience. – 2011. – Vol. 61, № 3. – P. 203–216. – Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/233818839>. – Назва з екрану.
4. Sueur J., Farina A., Gasc A., Pieretti N., Pavoine S. Acoustic Indices for Biodiversity Assessment and Landscape Monitoring // Ecological Indicators. – 2014. – Vol. 36. – P. 554–561. – Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://thecela.org/wp-content/uploads/LRR12-SELECTING-APPROPRIATE-ACOUSTIC-INDICES-FOR-BIODIVERSITY-ASSESSMENTS-IN-DIFFERENT-ACOUSTIC-ENVIRONMENTS.pdf>. – Назва з екрану.
5. Pu B., Li Y., Wu H., Xu X. Selecting appropriate acoustic indices for biodiversity assessments in different acoustic environments // CELA Conference Paper. – 2023. – 7 p. – Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://thecela.org/wp-content/uploads/LRR12-SELECTING-APPROPRIATE-ACOUSTIC-INDICES-FOR-BIODIVERSITY-ASSESSMENTS-IN-DIFFERENT-ACOUSTIC-ENVIRONMENTS.pdf>. – Назва з екрану.

6. Alcocer I., Lima H., Sugai L., Llusia D. Acoustic indices as proxies for biodiversity: a meta-analysis // *Biological Reviews*. – 2022. – Vol. 97, № 5. – P. 2209–2236. – Электронный ресурс. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X24002048>. – Назва з екрану.
7. Magurran A. E. *Measuring Biological Diversity*. – Oxford : Blackwell Publishing, 2004. – 256 p.
8. Krebs C. J. *Ecology: The Experimental Analysis of Distribution and Abundance*. – 6th ed. – San Francisco : Benjamin Cummings, 2009. – 655 p. – Электронный ресурс. – Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/288261497>. – Назва з екрану.
9. Erwin T. L. Tropical forest: canopy beetles and species richness // *The Coleopterists Bulletin*. – 1982. – Vol. 36. – P. 74–75. – Электронный ресурс. – Режим доступа: <https://www.jstor.org/stable/4007884>. – Назва з екрану.
10. Simpson E. H. Measurement of Diversity // *Nature*. – 1949. – Vol. 163. – P. 688. – Электронный ресурс. – Режим доступа: <https://www.nature.com/articles/163688a0>. – Назва з екрану.
11. Shannon C. E., Weaver W. *The Mathematical Theory of Communication*. – Urbana : University of Illinois Press, 1949. – 117 p. – Электронный ресурс. – Режим доступа: https://pure.mpg.de/rest/items/item_2383161. – Назва з екрану.
12. Chapman P. M. Diversity indices in environmental science // *Environmental Toxicology and Chemistry*. – 2010. – Vol. 29. – P. 1–3. – Электронный ресурс. – Режим доступа: <https://setac.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/etc.108>. – Назва з екрану.
13. Gibb R., Browning E., Glover-Kapfer P., Jones K. E. Emerging opportunities and challenges for passive acoustic monitoring of biodiversity // *Methods in Ecology and Evolution*. – 2023. – Электронный ресурс. – Режим доступа:

<https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/2041-210X.14194>. –

Назва з екрану.

14. Tuia D., Kellenberger B., Beery S., et al. Perspectives in machine learning for wildlife conservation // *Nature Communications*. – 2022. – Vol. 13. – Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9804652/>. – Назва з екрану.
15. Eldridge A., Guyot P., Moscoso P., et al. Sounding out ecoacoustic metrics: Avian species richness is predicted by acoustic indices in temperate but not tropical habitats // *Ecological Indicators*. – 2018. – Vol. 95. – P. 939–952. – DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.07.014.
16. Latifi M., Fakheran S., Moshtaghi M., Ranaie M., Mahmoudzadeh Tussi P. Soundscape analysis using eco-acoustic indices for the birds biodiversity assessment in urban parks // *Ecological Informatics*. – 2023. – Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/369743905>. – Назва з екрану.
17. Pu B., Li Y., Wu H., Xu X. Selecting Appropriate Acoustic Indices for Biodiversity Assessments in Different Acoustic Environments // *Proceedings of the CELA 2023 Conference*. – San Antonio (USA), 2023. – 7 p.
18. Slade A.-A., McKnight D. T., Nordberg E. J. Effectiveness of acoustic indices as indicators of vertebrate biodiversity // *Ecological Indicators*. – 2023. – Vol. 149. – Article ID 110146. – DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.110146.
19. Kotiani M., Biniwale S., Mourya P., et al. Measuring biodiversity with sound: How effective are acoustic indices for quantifying biodiversity in a tropical dry forest // *Conference of Soundscape Ecology (ConSP 2024)*. – 2024. – Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/376512908>. – Назва з екрану.
20. Clark M. L. Soundscape components inform acoustic index patterns and refine estimates of bird species richness // *Frontiers in Remote Sensing*. – 2023. – 8 p. – DOI: 10.3389/frsen.2023.1156837.

- 21.Kahl S., et al. BirdNET: A deep learning solution for avian diversity monitoring. – 2021. – Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://github.com/kahst/BirdNET>. – Назва з екрану.
- 22.Pérez-Granados C. Assessing parameter sensitivity in BirdNET species classification // Avian Research. – 2023. – DOI: 10.1007/s42991-023-00336-z.
- 23.Sullivan B. L., et al. eBird: A citizen-based bird observation network // Biological Conservation. – 2009. – DOI: 10.1016/j.biocon.2009.04.006.
- 24.Guyot P., Eldridge A. Python implementation of acoustic indices and low-level descriptors. – 2023. – Електронний ресурс. – Режим доступу: https://github.com/patriceguyot/Acoustic_Indices. – Назва з екрану.