

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ХІМІЇ ТА ЕКОЛОГІЇ**

Кафедра екології та охорони навколишнього середовища

Дипломна робота магістра

**ОЦІНКА АНТРОПОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТА БІОФОНІЇ
УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ НА ПРИКЛАДІ МІСТА УЖГОРОД**

Виконав: студент II курсу

ОС Магістр спеціальності 101 Екологія

Назаренко Богдан Олександрович

Керівник: к.х.н., доц. Мільович С.С.

Рецензент: к.х.н., доц. Кут М.

Ужгород – 2025

ЗМІСТ

ВСТУП	4
Розділ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	7
1.1. Поняття шуму та звукового ландшафту (Soundscape) в екології	7
1.1.1. Шум: визначення та ключові акустичні параметри в екології	8
1.1.2. Частотні характеристики акустичного середовища та ефект спектрального маскування	8
1.1.3. Амплітуда акустичних сигналів та феномен скорочення комунікаційного простору	9
1.1.4. Часовий патерн акустичного впливу: хронічний та імпульсний шум	10
1.2. Структурна організація звукового ландшафту: таксономія джерел та акустична ніша	12
1.3. Вплив шуму на живі організми	15
1.3.1. Феномен акустичного маскування та механізми адаптивної пластичності вокалізації	16
1.3.2. Ефект Ломбарда: механізми та екологічна ціна вокальної адаптації	17
1.3.3. Спектральна пластичність та частотний зсув вокалізації	18
1.3.4. Часове уникнення інтерференції: модифікація добових ритмів активності	19
1.4. Фізіологічний стрес: нейроендокринні та імунологічні наслідки	20

1.4.1. Імуносупресія та порушення онтогенезу: фізіологічна ціна хронічного стресу	21
1.4.2. Оксидативний стрес та генотоксичні ефекти акустичного навантаження	23
1.4.3. Поведінкові зміни та екологічні наслідки: від індивіда до популяції	24
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ТА УМОВИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	28
2.1. Акустичні індекси як інструмент біоіндикації та оцінки якості середовища	28
2.1.1. Інтегральна оцінка акустичного навантаження та перцептивної гучності: метрика LUFS	28
2.1.2. Оцінка структурної впорядкованості та акустичної гетерогенності: Спектральна Ентропія (H)	30
2.1.3. Сегрегація біофонії в умовах техногенного забруднення: Індекс акустичної складності (ACI)	31
2.2. Характеристика досліджуваних локацій в м. Ужгород	34
2.3 Апаратура та протокол збору даних	36
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ	39
РОЗДІЛ 4. ВИСНОВКИ	51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	53

ВСТУП

Актуальність проблеми. Урбанізація та техногенне навантаження на природні екосистеми призвели до формування якісно нового екологічного фактора — глобального шумового забруднення. Звукове середовище, яке протягом мільйонів років еволюції слугувало надійним каналом передачі інформації для живих організмів, зазнає безпрецедентних змін. Антропогенний шум, що характеризується високою інтенсивністю та специфічним спектральним складом (переважно низькочастотний діапазон), діє як потужний стрес-фактор, що призводить до акустичного маскування біологічних сигналів, фрагментації середовища існування та зниження біорізноманіття. Виникнення екології звукового ландшафту (Soundscape Ecology) як міждисциплінарного напрямку дозволило поглянути на цю проблему комплексно, розглядаючи звук не лише як фізичний забруднювач, а як інформаційний ресурс екосистеми. Для України, і зокрема для Закарпаття, де процеси урбанізації накладаються на унікальні природні комплекси, застосування методів екоакустики для моніторингу стану довкілля є надзвичайно актуальним. Використання акустичних індексів дозволяє здійснювати швидку, об'єктивну та неінвазивну оцінку стану екосистем, що відповідає сучасним європейським стандартам екологічного менеджменту.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дипломна робота виконана в рамках науково-дослідної роботи кафедри екології та охорони навколишнього середовища ДВНЗ «Ужгородський національний університет». Тема дослідження узгоджується з пріоритетним напрямком наукової роботи кафедри, зокрема з ініціативною темою «Розробка та вдосконалення систем і методів моніторингу об'єктів довкілля в контексті екологічної безпеки» (номер державної реєстрації). Робота спрямована на впровадження новітніх методів біоіндикації для оцінки антропогенного впливу на урбоекосистеми регіону

Мета дослідження. Метою роботи є проведення порівняльного аналізу звукових ландшафтів урбанізованих та природних екосистем м. Ужгород для оцінки рівня антропогенного навантаження та стану біофонії з використанням комплексу акустичних індексів.

Для досягнення мети слід було вирішити *завдання*:

- Проаналізувати сучасний стан досліджень у галузі екології звукового ландшафту та визначити вплив шумового забруднення на комунікативні стратегії та фізіологічний стан біоти.
- Розробити дизайн дослідження та провести пасивний акустичний моніторинг на обраних ділянках з різним рівнем антропогенного пресингу (міська забудова, паркові зони, приміські ліси).
- Розрахувати та проаналізувати акустичні індекси (ACI, ADI, H, LUFs) для кількісної характеристики біофонії, геофонії та антропофонії.
- Встановити кореляційні залежності між рівнем техногенного шуму та показниками акустичної активності і різноманіття біоти.
- Оцінити ефективність використання акустичних індексів як інструменту експрес-діагностики екологічного стану урбосистем.

Об'єкт дослідження, Звукові ландшафти урбанізованого середовища м. Ужгород.

Предмет дослідження. Інтегровані біоакустичні індекси та їх застосування для пасивного моніторингу біорізноманіття та рівня антропогенного навантаження на урбоекосистеми.

Методи дослідження. У роботі застосовано:

- Метод пасивного акустичного моніторингу: запис звукових ландшафтів за допомогою цифрових рекордерів.
- Біоакустичний аналіз: візуалізація спектрограм, фільтрація шумів.
- Математичне моделювання: розрахунок акустичних індексів (ACI, ADI, H) за допомогою пакетів `mathplotlib` та `librosa` у середовищі програмування Python.
- Статистичні методи: кореляційний аналіз (коефіцієнт Спірмена), порівняльний аналіз (критерії Манна-Вітні, Краскела-Уолліса) для оцінки достовірності відмінностей між локаціями.

Наукова новизна одержаних результатів. Вперше для території Закарпаття проведено комплексне дослідження звукових ландшафтів із застосуванням методології *Soundscape Ecology*. Отримано нові дані про реакцію місцевої

орнітофауни на шумове забруднення, що проявляється у зміні значень індексів акустичної складності (АСІ). Підтверджено гіпотезу про негативну кореляцію між рівнем антропофонії та спектральним різноманіттям біофонії (індекс ADI) в умовах міста Ужгород. Адаптовано методику розрахунку індексу NDSI для умов малих міст України.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дослідження можуть бути використані міськими службами для екологічного зонування території міста, планування заходів зі зниження шумового навантаження в рекреаційних зонах та при розробці стратегії збереження біорізноманіття в умовах урбанізації. Запропонований методичний підхід може бути імплементований у систему регіонального екологічного моніторингу

Апробація результатів дослідження: Назаренко Б. Порівняльний аналіз звукових ландшафтів м. Ужгород: оцінка антропогенного навантаження та біофонії за допомогою акустичних індексів // Глобальні виклики людства: суспільство, держава, людина : зб. матеріалів III Міжнар. студент.-аспірант. наук.-практ. конф. (м. Львів, 7 листоп. 2025 р.). – Львів [Електронне видання], 2025. – С. 316–318.

Структура та обсяг роботи. Робота викладена на 56 сторінках, складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел (31 найменувань) та. Містить 11 рисунків та 5 таблиць.

РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1. Поняття шуму та звукового ландшафту (Soundscape) в екології

У сучасному науковому дискурсі підхід до розуміння звуку зазнав суттєвих трансформацій. Якщо класична фізика трактує звук насамперед як механічну хвилю, що поширюється у пружному середовищі та характеризується амплітудою і частотою, то для еколога це визначення є недостатнім. В екологічному контексті звук розглядається як фундаментальна властивість природи та критично важливий інформаційний ресурс, що відображає динаміку біологічних, геофізичних та антропогенних процесів на певній території.

Саме на цьому стику дисциплін виникла екологія звукового ландшафту (Soundscape Ecology). Цей напрямок фокусується не просто на вимірюванні рівня шуму, а на вивченні складних взаємозв'язків між акустичним середовищем та біотою. Згідно з дослідженнями Браяна П'яновскі та його колег, звуковий ландшафт слід сприймати як екологічну «мозаїку», де кожен звук несе дані про здоров'я екосистеми, щільність популяцій та поведінкові патерни видів [1].

Акустичне середовище, по суті, виступає посередником у стосунках між організмами та їхнім оточенням. Живі істоти не лише пасивно сприймають звуки, але й активно формують акустичні ніші, конкуруючи за частотні діапазони, щоб уникнути маскування сигналів шумом вітру чи транспорту. Альмо Фаріна у своїй теорії екоакустики наголошує, що для тварин звук є кодом, який дозволяє інтерпретувати ландшафт, знаходити партнерів та уникати небезпеки, тому деградація звукового середовища може мати такі ж фатальні наслідки, як і втрата фізичного оселища [2].

Таким чином, акустичний моніторинг дозволяє оцінювати стан біорізноманіття дистанційно та неінвазивно, аналізуючи спектральну та часову структуру звуків. Дослідники (Sueur & Farina, 2015) зазначають, що складність та насиченість біофонії (звуків живих організмів) прямо корелює зі стійкістю екосистеми, тоді як домінування монотонного техногенного шуму (антропофонії) свідчить про її деградацію та зниження екологічної ємності [3].

1.1.1. Шум: визначення та ключові акустичні параметри в екології

В екологічному контексті традиційне визначення шуму як «небажаного звуку» (яке є суб'єктивним і антропоцентричним) трансформується в поняття об'єктивного стрес-фактора або абіотичного забруднювача. Наукова спільнота визначає екологічний шум як будь-який акустичний сигнал (антропогенного або природного походження), що втручається в нормальне функціонування біологічних систем, порушує комунікацію тварин або викликає фізіологічний стрес.

Згідно з дослідженнями Kight та Swaddle (2011), вплив шуму на живі організми не є універсальним, а залежить від фізичної структури звуку. Для оцінки екологічного впливу шуму критичне значення мають три основні акустичні параметри: частота, амплітуда та часові характеристики (тривалість і патерн).[4]

1.1.2. Частотні характеристики акустичного середовища та ефект спектрального маскування

Частота звуку, що фізично визначається кількістю коливань звукової хвилі за одиницю часу (вимірюється в Герцах, Гц), в екоакустиці є фундаментальним параметром, який визначає структуру комунікаційних каналів у біоценозах. Згідно з гіпотезою акустичної ніші (Acoustic Niche Hypothesis), розробленою Берні Краузе, види в стабільних екосистемах еволюціонували таким чином, щоб займати різні частотні діапазони, мінімізуючи конкуренцію за ефір [5]. Проте сучасне антропогенне навантаження порушує цей баланс через явище акустичного маскування (acoustic masking).

Більшість джерел антропогенного шуму (автомобільний транспорт, авіація, робота важкої промисловості та систем вентиляції) генерують звукову енергію переважно в низькочастотному спектрі — зазвичай у діапазоні від 20 Гц до 2000 Гц (2 кГц). Ця зона є критично важливою для комунікації багатьох таксономічних груп, оскільки низькочастотні звуки мають властивість поширюватися на значні відстані з меншим затуханням у природному середовищі.

У результаті виникає конфлікт між техногенним шумом та біофонією. Коли спектр шуму перекриває частотний діапазон вокалізації тварини (наприклад,

шлюбні заклики жаб, територіальні пісні птахів або комунікаційні сигнали риб), співвідношення сигнал/шум (SNR) критично знижується. Сигнал стає нерозбірливим для реципієнта, що загрожує репродуктивному успіху та виживанню популяції.

Як реакція на цей тиск, у багатьох урбанізованих популяціях тварин спостерігається явище спектральної пластичності. Найбільш документованим прикладом є так званий «ефект міського зсуву частоти» у птахів. Дослідження (Slabbekoorn & Peet, 2003) показали, що великі синиці (*Parus major*) у містах співають із вищою мінімальною частотою, ніж їхні лісові родичі, щоб «відстроїтися» від низькочастотного гулу міського трафіку. Однак така адаптація може мати свою еволюційну ціну, оскільки високочастотні пісні можуть сприйматися самками як менш привабливі або свідчити про менший розмір самця [6].

1.1.3. Амплітуда акустичних сигналів та феномен скорочення комунікаційного простору

Амплітуда звукової хвилі, що є фізичним відображенням її енергетичного потенціалу, в екологічних дослідженнях інтерпретується через поняття інтенсивності або гучності та вимірюється у децибелах (дБ). Якщо частота визначає «канал» комунікації, то амплітуда визначає енергетичну потужність сигналу та дальність його поширення. Вплив високої інтенсивності звуку на біоту є комплексним і реалізується на двох рівнях: фізіологічному (пряме ушкодження) та екологічному (інформаційна ізоляція).

Екстремальні рівні звукового тиску (як правило, понад 90–100 дБ, залежно від виду) можуть викликати безпосередні травми слухового апарату тварин. У науковій літературі цей процес класифікують за ступенем зворотності:

1. Тимчасове зміщення порогу слуху (TTS — Temporary Threshold Shift): короткочасне зниження чутливості після акустичного стресу, що відновлюється з часом (наприклад, після прольоту літака).

2. Постійне зміщення порогу слуху (PTS — Permanent Threshold Shift): незворотна глухота в певних діапазонах через загибель волоскових клітин внутрішнього вуха.

Окрім слухових травм, висока амплітуда шуму провокує нейроендокринні реакції, зокрема хронічне підвищення рівня кортикостероїдів, що пригнічує імунну систему та знижує репродуктивний успіх [4].

Набагато підступнішим для екосистем є вплив хронічного шуму помірної інтенсивності (наприклад, від автотрас). Ключовим наслідком тут є скорочення «активного простору» (reduction of active space). Активний простір — це максимальна відстань, на якій акустичний сигнал (спів птаха, квакання жаби, ультразвук кажана) залишається розбірливим для отримувача.

Згідно з дослідженнями, навіть незначне підвищення фонового шуму призводить до катастрофічного зменшення комунікаційної дистанції. Це зумовлено логарифмічною природою децибельної шкали: підвищення рівня шуму всього на 3–6 дБ може скоротити площу, на якій тварина здатна чути партнера або хижака, на 50–90% [7].

Цей ефект діє як «акустичний туман», що фрагментує популяції. Тварини можуть фізично знаходитися поруч, але акустично бути ізольованими одне від одного. Це унеможливорює захист території, пошук шлюбних партнерів та вчасне виявлення небезпеки, що в довгостроковій перспективі призводить до зниження біорізноманіття поблизу джерел шуму [8].

1.1.4. Часовий патерн акустичного впливу: хронічний та імпульсний шум

Третім критичним параметром, що визначає екологічну токсичність шуму, є його часова структура або темпоральний патерн. Вплив антропогенних звуків на біоту не є лінійним і суттєво різниться залежно від тривалості, повторюваності та передбачуваності акустичної події. В екоакустиці прийнято розрізняти два основні типи шумового забруднення: хронічний (безперервний) та інтермітуючий (імпульсний), кожен з яких запускає специфічні адаптивні або патологічні механізми у тварин.

Хронічний (постійний) шум - тип забруднення характеризується тривалою дією та відносно стабільною амплітудою (наприклад, гул автомагістралей, робота газокомпресорних станцій). Хронічний шум діє як постійний екологічний прес, що призводить до системних змін у поведінці популяцій [8].

- Ефект Ломбарда: для подолання постійного шумового фону тварини змушені збільшувати амплітуду (гучність) своїх сигналів. Це явище, відоме як ефект Ломбарда, вимагає значних метаболічних витрат, що може виснажувати організм і скорочувати тривалість життя [9].
- Уникнення біотопів: Довготривалий шум часто діє як «звуковий паркан». Дослідження показали, що багато видів птахів та ссавців повністю покидають придатні для життя території лише через неможливість акустичного орієнтування, що призводить до фрагментації ареалів та зниження генетичного різноманіття [8].

Інтермітуючий (імпульсний) шум - тип шуму відрізняється непередбачуваністю, різким наростанням амплітуди та короткими проміжками дії (наприклад, проліт авіації, вибухи у кар'єрах, постріли, рух поїздів). Його вплив є гострішим і часто викликає миттєві фізіологічні реакції:

Реакція переорієнтації (Startle/Reorientation response): Раптовий гучний звук викликає переривання поточної діяльності (харчування, догляд за потомством) і перехід у стан підвищеної тривожності або панічну втечу.

Хронічний стрес через непередбачуваність: Оскільки тварини не можуть адаптуватися до хаотичного графіка шумових подій, у них розвивається стан постійної настороженості (hypervigilance). Це скорочує час, відведений на пошук їжі, що критично впливає на виживання, особливо у зимовий період.

Таким чином, часова структура шуму є не менш важливою за його гучність. Постійний шум витісняє види з екосистеми, тоді як непередбачуваний імпульсний шум знижує індивідуальну пристосованість особин через перманентний стрес. [4]

1.2. Структурна організація звукового ландшафту: таксономія джерел та акустична ніша

Згідно з фундаментальною концептуальною моделлю, розробленою піонерами дисципліни Браяном П'яновським (В. Pijanowski) та Альмо Фаріною (А. Farina), звуковий ландшафт не є хаотичним набором шумів, а являє собою складну, ієрархічно організовану систему. Акустична структура будь-якої екосистеми формується внаслідок динамічної інтерференції трьох основних класів джерел звуку: біофонії, геофонії та антропофонії. Співвідношення та взаємодія цих компонентів визначають акустичну «підпис» (acoustic signature) ландшафту [1].

Біофонія (Biophony) є центральним компонентом звукового ландшафту в контексті оцінки біорізноманіття. Вона визначається як сукупність усіх звуків, що генеруються живими організмами в межах певної екосистеми. Цей спектр охоплює вокалізацію птахів, амфібій та ссавців, а також стридуляцію комах. На відміну від хаотичної та стохастичної природи геофонії чи антропофонії, біофонія характеризується високим рівнем внутрішньої організації та передбачуваності, що робить її ідеальним об'єктом для біоіндикації.

Фундаментальним теоретичним підґрунтям для аналізу біофонії є Гіпотеза акустичної ніші (Acoustic Niche Hypothesis — ANH), вперше сформульована Берні Краузе (Bernie Krause) наприкінці ХХ століття. Ця теорія постулює, що акустичний простір є лімітованим ресурсом, подібно до їжі чи території. У зрілих, непорушених екосистемах спільноти тварин еволюціонували шляхом коадаптації, щоб уникнути інтерференції (перекривання) сигналів [5].

Механізмом реалізації цієї гіпотези є спектрально-часовий розподіл ресурсів (spectro-temporal partitioning). Цей процес відбувається у двох вимірах:

1. Частотна стратифікація: Різні види займають специфічні частотні смуги (bandwidths). Наприклад, у типовому лісовому біоценозі низькі частоти можуть займати земноводні, середні — птахи, а ультрависокі — комахи та кажани. Це дозволяє сигналам проходити крізь середовище без значних спотворень, спричинених "конкурентами".

2. Часовий розподіл: Види, що використовують схожі частоти, розмежовують свою активність у часі (циркадні ритми). Це проявляється у феноменах ранкового та вечірнього хору (dawn/dusk chorus), а також у сезонній зміні домінуючих вокалістів.

Згідно з дослідженнями Farina (2014), насиченість та складність біофонії прямо корелюють зі стабільністю екосистеми. Високий індекс акустичної складності (ACI) зазвичай свідчить про те, що всі "акустичні ніші" зайняті, тобто екосистема функціонує повноцінно. Натомість, наявність "порожніх" частотних смуг на спектрограмі (так звані "акустичні прогалини") є раннім діагностичним маркером деградації біотопу, зникнення певних видів або інвазії чужорідних елементів [2].

Таким чином, біофонія розглядається не просто як сума голосів окремих тварин, а як емерджентна властивість екосистеми, що відображає її еволюційну зрілість та поточний екологічний стан.

Геофонія (Geophony) являє собою сукупність звуків, що генеруються небіологічними природними джерелами, і виступає фундаментальним, часто домінуючим компонентом акустичного середовища. Ця категорія охоплює широкий спектр сигналів, породжених геофізичними явищами: від ритмічного шуму морського прибою та турбулентності водних потоків до стохастичних звуків вітру, дощу, грозових розрядів та навіть сейсмічної активності.

В екологічній перспективі геофонія — це не просто пасивний «акустичний фон», а потужний селективний фактор, що формує еволюційний тиск на комунікаційні системи живих організмів. Звуки абіотичного походження часто займають низькочастотний спектр і мають високу енергію, що створює природні бар'єри для передачі біосигналів (ефект маскування) [1].

У відповідь на цей постійний тиск біота виробила низку адаптаційних механізмів. Найбільш показовим прикладом є феномен частотного зсуву у птахів та амфібій, що населяють прибережні зони гірських річок. Дослідження довели, що види, які живуть в умовах постійного низькочастотного шуму турбулентної води, еволюційно змістили свої вокалізації у вищий частотний діапазон, щоб уникнути

спектрального перекривання з геофонією. Це явище демонструє, що геофонія діє як «акустичний фільтр», який визначає, які види можуть успішно колонізувати певний біотоп [5].

Окрім того, геофонічні події часто слугують важливими інформаційними маркерами (cues) для тварин. Наприклад, звук наближення грози або шторму може запускати поведінкові реакції пошуку укриття, а шум дощу впливає на активність комах та, як наслідок, на харчову поведінку комахоїдних птахів та кажанів. Таким чином, геофонія є динамічним компонентом, що модулює як короткострокову поведінку, так і довгострокові еволюційні стратегії видів [9].

Антропофонія (Anthropophony), яку в деяких джерелах також класифікують як технофонія, є третім і найбільш динамічним компонентом сучасного звукового ландшафту. Вона охоплює весь спектр акустичних сигналів, що виникають внаслідок людської діяльності: від механічних шумів стаціонарних промислових об'єктів та транспортної інфраструктури (автомобільної, залізничної, авіаційної) до звуків агротехніки та урбаністичного фону.

На відміну від біофонії та геофонії, які коеволюціонували протягом мільйонів років, формуючи збалансовану акустичну структуру, антропофонія є еволюційно новим фактором. Вона діє як інвазивний елемент, що порушує сталість екосистеми. Ключовою проблемою антропогенного шуму є його спектральна структура: більшість техногенних джерел генерують звукову енергію високої інтенсивності в низькочастотному діапазоні (переважно до 2 кГц).

Ця фізична особливість призводить до явища, яке в екоакустиці називають «хроматичним перекриттям» (spectral overlap). Оскільки низькі частоти є основним каналом комунікації для багатьох таксонів (більшість риб, безхвості амфібії, значна частина птахів та ссавців), антропофонія створює ефект щільного акустичного туману. Це призводить до маскування біологічних сигналів, блокуючи передачу інформації про територіальні межі, наявність хижаків або пошук партнера. [5]

Дослідження показали, що в екосистемах із високим рівнем антропофонії спостерігається спрощення структури звукового ландшафту: індекси біорізноманіття падають, а складний патерн біофонії заміщується монотонним

техногенним гулом. Більше того, антропофонія здатна поширюватися на значні відстані від джерела (феномен «дорожнього ефекту»), фрагментуючи природні оселища навіть за відсутності фізичних бар'єрів.

Таким чином, антропофонія розглядається не просто як побічний продукт цивілізації, а як глобальний гомогенізуючий фактор, що знижує акустичну складність та інформаційну ємність природних екосистем [1].

Таблиця 1.1. Структурні компоненти звукового ландшафту

Компонент	Джерело	Частотний діапазон (типовий)	Часова структура	Екологічна роль
Біофонія	Птахи, амфібії, комахи, ссавці	2 кГц – 20+ кГц	Циркадні ритми, сезонність, висока варіабельність	Комунікація, статевий добір, територіальність
Геофонія	Вітер, дощ, грім, вода	Широкосмуговий (часто < 1 кГц)	Стохастична, залежить від погоди	Природний фон, абіотичний фільтр
Антропофонія	Транспорт, промисловість	Переважно < 2 кГц	Постійна (хронічна) або імпульсна	Стрес-фактор, маскування, фрагментація

1.3. Вплив шуму на живі організми

Вплив антропогенного шуму на живі організми є комплексним і багаторівневим процесом, який виходить далеко за межі простого акустичного дискомфорту. У сучасній екоакустиці шум класифікується як хронічний екологічний стрес-фактор та інформаційний забруднювач, що руйнує комунікаційні канали екосистем. Згідно з концепцією Kight & Swaddle (2011), реакція організмів

на шум реалізується через три взаємопов'язані шляхи: акустичне маскування сигналів, нейроендокринний стрес та модифікацію поведінкових патернів [4].

1.3.1. Феномен акустичного маскування та механізми адаптивної пластичності вокалізації

В екології звукового ландшафту акустичне маскування (acoustic masking) визначається як фундаментальний фізичний процес, при якому поріг чутності одного звуку (біологічного сигналу) підвищується за наявності іншого звуку (шуму). З точки зору теорії інформації, це явище є критичним збоєм у каналі передачі даних: коли енергія фонового шуму перебиває частотний діапазон комунікаційних сигналів, відбувається різке зниження співвідношення сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio — SNR). Для успішної детектизації сигнал повинен перевищувати рівень фонового шуму на певна величину (критичне співвідношення), і саме цей параметр порушується в умовах антропогенного навантаження [10].

Більшість джерел техногенного шуму (дорожній трафік, авіація, робота важкої техніки) генерують звукову енергію з максимальною амплітудою в низькочастотному домені (< 2 кГц). Це створює ефект «спектральної стіни» для широкого кола таксонів, вокалізація яких еволюційно закріплена саме в цьому діапазоні. Найбільш вразливими є риби (Sciaenidae), безхвості амфібії (*Anura*) та значна частина горобцеподібних птахів (*Passeriformes*), чії шлюбні та територіальні сигнали просто «розчиняються» у низькочастотному гулі [11].

Найвагомішим екологічним наслідком маскування є редукція «активного простору» (active space) — об'єму або площі середовища, в межах якого сигнал залишається розбірливим для реципієнта (конспецифічної особини).

Враховуючи логарифмічну природу поширення звуку, навіть незначне зростання рівня фонового шуму призводить до непропорційно великого скорочення дистанції комунікації. Фундаментальні дослідження Barber et al. (2010) продемонстрували, що підвищення шумового фону на 6 дБ може скоротити активний простір на 50%, а підвищення на 10–15 дБ (що є типовим для приміських

зон) зменшує площу ефективної комунікації на 90%. Це фактично ізолює особин, унеможливаючи приваблення шлюбних партнерів та своєчасне виявлення загроз [7].

У відповідь на цей селективний тиск популяції тварин демонструють фенотипову вокальну пластичність, намагаючись відновити ефективність комунікації через три основні механізми.

1.3.2 Ефект Ломбарда: механізми та екологічна ціна вокальної адаптації

Серед стратегій подолання акустичного маскування найбільш поширеною та еволюційно давньою реакцією є ефект Ломбарда (Lombard Effect). В екоакустиці цей феномен визначається як рефлекторна зміна параметрів вокалізації, насамперед її амплітуди (гучності), у відповідь на підвищення рівня фонового шуму. Це явище базується на механізмі аудіо-вокального зворотного зв'язку: тварина в реальному часі моніторить власні сигнали та навколишній фон, автоматично корегуючи інтенсивність звуку для підтримання належного співвідношення сигнал/шум (SNR) [12].

Класичним об'єктом досліджень цього ефекту в урбанізованих екосистемах став соловейко західний (*Luscinia megarhynchos*). Дослідження, проведені в Берліні, виявили, що самці цього виду здатні демонструвати вражаючу вокальну пластичність, збільшуючи гучність своїх пісень у шумних міських зонах. Брамм (Brumm, 2004) зафіксував підвищення амплітуди до +14 дБ порівняно з лісовими популяціями. Враховуючи, що шкала децибел є логарифмічною, це означає збільшення звукового тиску більш ніж у 5 разів, що дозволяє птахам частково відновити свій «активний простір» комунікації навіть в умовах інтенсивного трафіку [9].

Однак ця адаптація не є «безкоштовною» з точки зору біоенергетики. Вокалізація на підвищених тонах вимагає значних метаболічних витрат. Збільшення амплітуди співу прямо корелює зі зростанням споживання кисню та виснаженням енергетичних резервів, необхідних для інших життєво важливих функцій (пошук їжі, терморегуляція, імунний захист). Це створює ситуацію

компромісу (trade-off), де тварина змушена витратити надмірні ресурси лише для того, щоб бути почутою [13].

Крім того, ефект Ломбарда має чіткі фізіологічні обмеження (physiological ceiling). Тварина не може підвищувати гучність нескінченно; існує верхня межа фізичних можливостей голосового апарату (сиринкса у птахів або гортані у ссавців). Коли рівень антропогенного шуму перетинає цю межу, комунікація стає неможливою, що призводить до витіснення виду з території. Також надмірно гучний спів може стати демаскуючим фактором, приваблюючи хижаків, що перетворює адаптацію на фактор ризику [14].

1.3.3. Спектральна пластичність та частотний зсув вокалізації

Альтернативною до енергетичного посилення (ефекту Ломбарда) стратегією адаптації є спектральний зсув (Frequency Shift). Це явище являє собою модифікацію частотних характеристик акустичного сигналу, спрямовану на уникнення зони спектрального перекривання з фоновим шумом. Оскільки енергетичний максимум антропогенного шуму (зокрема, від автомобільного транспорту та важкої промисловості) зосереджений у низькочастотному діапазоні (зазвичай нижче 1,5–2 кГц), багато видів тварин еволюційно або поведінково зміщують свої комунікаційні сигнали у вищій частотний регістр, де акустичний простір залишається відносно вільним.

Фундаментальним доказом існування цього механізму стало класичне дослідження Ганса Слаббекорна та Марка Піта (Slabbekoorn & Peet, 2003), проведене на популяціях великої синиці (*Parus major*). Вчені проаналізували пісні самців у різних районах європейських міст і виявили чітку кореляцію: птахи, що гніздяться на галасливих урбанізованих територіях, співають із значно вищою мінімальною частотою (Low Freq), ніж їхні родичі з тихих лісових масивів. Це дозволяє їм вивести свої сигнали з-під «спектральної тіні» низькочастотного гулу, забезпечуючи розбірливість пісні для самок та конкурентів [6]. Цей феномен розглядається науковцями у двох площинах:

1. **Фенотипова пластичність:** Здатність окремої особини миттєво змінювати висоту співу залежно від поточного рівня шуму.
2. **Культурна еволюція:** Поступова зміна структури пісень у популяції, коли молоді птахи навчаються співати, копіюючи лише ті елементи пісні дорослих, які добре чути на фоні міського шуму, тоді як низькочастотні елементи «випадають» із репертуару.

Варто зазначити, що хоча спектральний зсув і покращує передачу інформації, він створює серйозний еволюційний конфлікт (trade-off) із статевим добором. У багатьох видів птахів низька частота голосу є чесним сигналом розміру тіла та якості самця (чим більший птах, тим нижчий звук він може видати). Відтак, самці, змушені співати тонше через шум, можуть сприйматися самками як менш привабливі або фізично слабші, що потенційно знижує їхній репродуктивний успіх навіть за умови успішної передачі сигналу [15].

1.3.4. Часове уникнення інтерференції: модифікація добових ритмів активності

Третім вектором адаптації до акустичного забруднення є часовий зсув (Temporal Shift), або стратегія часового уникнення. На відміну від зміни фізичних параметрів самого сигналу (гучності чи частоти), цей механізм передбачає поведінкову модифікацію циркадних ритмів (circadian rhythms) активності. Тварини зміщують періоди вокалізації, полювання або територіальної поведінки на ті часові інтервали, коли рівень антропогенного шуму є мінімальним — зазвичай це нічні або передсвітанкові години.

Еталонним прикладом такої пластичності стала поведінка європейської вільшанки (*Erithacus rubecula*) в урбанізованих ландшафтах. У природних умовах цей вид є денним, з піком вокальної активності на світанку (dawn chorus). Проте дослідження, проведені Фуллером та колегами (Fuller et al., 2007) у місті Шеффілд (Велика Британія), виявили пряму кореляцію між рівнем денного шуму та ймовірністю нічного співу. У зонах, де денний рівень шуму перевищував 60 дБ, вільшанки переходили на нічну активність, використовуючи «акустичне вікно»,

коли трафік стихає. Важливо, що дослідження розмежувало вплив шуму та світлового забруднення, довівши, що саме акустична інтерференція є основним тригером цього зсуву [16].

Хоча така поведінка дозволяє уникнути маскуванню сигналу, вона несе приховані екологічні ризики та фізіологічні витрати:

1. Синергія зі світловим забрудненням (ALAN — Artificial Light at Night): Часовий зсув часто стає можливим лише за наявності штучного освітлення, яке дозволяє денним птахам орієнтуватися вночі. Це створює подвійний антропогенний тиск на нейроендокринну систему [17].
2. Порушення циклів сну: Перехід на нічну активність призводить до депривації сну та хронічної втоми, що знижує когнітивні здібності та пильність птахів вдень, роблячи їх вразливішими для хижаків.
3. Метаболічні втрати: Спів у нічний час, коли температура повітря нижча, вимагає значно більших енергетичних витрат на терморегуляцію порівняно з денним співом.
4. Комунікаційний дисонанс: Якщо самці співають вночі, а самки продовжують дотримуватися природного денного ритму (сплять вночі), біологічна функція пісні як шлюбного заклику втрачається, що може призвести до зниження репродуктивного успіху популяції [18].

1.4. Фізіологічний стрес: нейроендокринні та імунологічні наслідки

На фізіологічному рівні вплив антропогенного шуму сприймається організмом як сигнал потенційної загрози, що запускає каскад нейроендокринних реакцій, відомий як генералізований адаптаційний синдром. Центральним механізмом цієї відповіді є активація гіпоталамо-гіпофізарно-наднирникової осі (HPA axis).

При хронічній акустичній експозиції цей механізм переходить у патологічний стан. Постійне подразнення слухових рецепторів стимулює надмірну секрецію глюкокортикоїдів — класу стероїдних гормонів, які мобілізують енергетичні ресурси організму для реакції «бий або біжи». У ссавців основним маркером стресу

виступає кортизол, тоді як у птахів, рептилій та амфібій цю функцію виконує кортикостерон.

Стійке підвищення базового рівня цих гормонів має деструктивні наслідки для гомеостазу: воно пригнічує «нетермінові» фізіологічні процеси, такі як імунна відповідь, ріст та репродуктивна функція (гальмування синтезу статевих гормонів). Це явище в екології описується терміном «алостатичне навантаження» (allostatic load) — ціна, яку платить організм за спробу адаптуватися до несприятливих умов.[19]

Найбільш переконливим емпіричним доказом прямого причинно-наслідкового зв'язку між антропогенним шумом та фізіологічним стресом у дикій природі стало унікальне дослідження Розалінди Ролланд та колег (Rolland et al., 2012), проведене на популяції північних гладких китів (*Eubalaena glacialis*) у затоці Фанді (Канада).

Це дослідження стало можливим завдяки трагічному збігу обставин — терактам 11 вересня 2001 року. Внаслідок цих подій було тимчасово призупинено морське судноплавство в акваторії, що призвело до раптового зниження рівня низькочастотного підводного шуму на 6 дБ (зниження інтенсивності звукової енергії майже в 4 рази). Аналіз зразків фекалій китів, зібраних у цей «період тиші», показав різке та статистично значуще падіння концентрації метаболітів глюкокортикоїдів порівняно з контрольними періодами активного трафіку. Цей «природний експеримент» вперше незаперечно довів, що навіть звичний для тварин фоновий шум судноплавства є джерелом хронічного фізіологічного стресу, який невидимо виснажує популяції морських ссавців [20].

1.4.1. Імуносупресія та порушення онтогенезу: фізіологічна ціна хронічного стресу

Вплив акустичного забруднення на молоді організми, що перебувають на стадії активного росту, реалізується через механізм енергетичного перерозподілу (resource allocation trade-off). В екологічній фізіології цей процес описується як вимушений компроміс: в умовах постійної активації симпатичної нервової системи

(реакція «бий або біжи») організм змушений перенаправляти метаболічні ресурси з довгострокових інвестицій (соматичний ріст, регенерація тканин, формування імунітету) на забезпечення негайного виживання (підтримання високого тону м'язів, мобілізація глюкози).

Особливо драматичні наслідки цього процесу спостерігаються під час раннього онтогенезу. Пташенята гніздових видів, які фізично не можуть покинути зону шумового забруднення, стають заручниками несприятливого акустичного середовища. Хронічно підвищений рівень глюкокортикоїдів (гормонів стресу) діє як потужний інгібітор синтезу білків та гормону росту, що призводить до затримки фізичного розвитку. У таких особин фіксується менша маса тіла, сповільнений ріст пір'я та загальне відставання у морфометричних показниках порівняно з контрольними групами з тихих територій.

Окрім макроскопічних змін, шум залишає слід на молекулярному рівні, прискорюючи процеси клітинного старіння. Фундаментальне дослідження Натана Кляйста та колег (Kleist et al., 2018), проведене на популяції західного синяка (*Sialia mexicana*) в зоні газовидобувних компресорів, виявило кореляцію між рівнем шуму та довжиною теломер — захисних кінцевих ділянок хромосом. Вкорочення теломер є маркером біологічного віку клітини; його прискорення під дією шуму свідчить про те, що пташенята «старішають» ще до вильоту з гнізда. Механізмом цього явища, ймовірно, є оксидативний стрес, спровокований гормональним дисбалансом. Паралельно відбувається пригнічення імунної системи (імуносупресія). Оскільки кортикостероїди мають природну протизапальну дію, їхній надлишок знижує резистентність організму до інфекцій та інвазій. Дослідження показало, що пташенята в шумних гніздах значно частіше страждають від паразитарних інвазій (зокрема, личинками паразитичних мух роду *Philornis*), що суттєво знижує їхні шанси на виживання у перший рік життя. Таким чином, акустичний стрес не лише гальмує розвиток, але й робить популяцію вразливою до біотичних загроз [21].

1.4.2. Оксидативний стрес та генотоксичні ефекти акустичного навантаження

Найглибшим рівнем фізіологічного впливу шуму, який часто залишається поза увагою класичних екологічних досліджень, є порушення клітинного гомеостазу, що призводить до оксидативного стресу та пошкодження генетичного апарату. Цей процес є прямим наслідком гіперактивації метаболізму у відповідь на стрес. Механізм розвитку патології виглядає наступним чином: сприйняття шуму як загрози запускає реакцію «бий або біжи», що вимагає миттєвої мобілізації енергії. Це призводить до інтенсифікації клітинного дихання та підвищеного навантаження на мітохондрії. Побічним продуктом цього «метаболічного форсажу» є надлишкова продукція активних форм кисню (АФК) або вільних радикалів (супероксид-аніону, пероксиду водню тощо).

У нормальних умовах організм нейтралізує АФК за допомогою ферментативних (каталаза, супероксиддисмутаза) та неферментативних антиоксидантів. Проте за умов хронічного шумового впливу продукція вільних радикалів перевищує компенсаторні можливості антиоксидантних систем. Виникає стан окислювального стресу, який викликає перекисне окислення ліпідів клітинних мембран, пошкодження білків та, що найкритичніше, генотоксичні ефекти [22].

Вплив АФК на ДНК може проявлятися у вигляді:

1. Прямих пошкоджень структури: Окислення азотистих основ (зокрема, утворення 8-оксогуаніну), що може призводити до помилок при реплікації та виникнення мутацій.
2. Прискореного вкорочення теломер: Як було зазначено у дослідженнях на птахів, оксидативний стрес атакує теломери — кінцеві ділянки хромосом, що відповідають за стабільність геному та кількість можливих поділів клітини. Шумове забруднення, таким чином, діє як каталізатор прискореного біологічного старіння організму, скорочуючи тривалість життя особин [23].

Екологічна небезпека цього явища полягає у його трансгенераційному характері. Пошкодження ДНК у статевих клітинах (гаметах) або епігенетичні зміни, викликані стресом батьківських особин, можуть передаватися наступним

поколінням. Це означає, що потомство, народжене на шумних територіях, може мати вроджено знижену життєздатність, слабший імунітет та менший репродуктивний потенціал, навіть якщо саме потомство згодом опиниться в тихих умовах. Це створює загрозу «прихованого вимирання» популяції через накопичення генетичного вантажу [24].

1.4.3. Поведінкові зміни та екологічні наслідки: від індивіда до популяції

В екології довготривалий вплив шуму розглядається як фактор, що призводить до «функціональної втрати оселища» (functional habitat loss). Цей термін описує ситуацію, коли біотоп залишається фізично неушкодженим (збережена рослинність, наявність кормової бази та місць для гніздування), але стає непридатним для життя через несприятливе акустичне середовище. Шум діє як невидимий, але ефективний бар'єр, що обмежує дисперсію тварин та спричиняє фрагментацію ареалів, ізолюючи популяції навіть за відсутності фізичних перешкод.

Ключовим механізмом цього процесу є поведінкове уникнення (avoidance behavior). Види, чутливі до акустичного забруднення (так звані «шумофоби»), змушені емігрувати з зон акустичного дискомфорту в тихіші, але часто менш ресурсні або перенаселені ділянки. Це призводить до локального вимирання видів на забруднених територіях та зміни структури угруповань: замість складних, багатовидових спільнот формуються спрощені екосистеми, де домінують декілька толерантних до шуму видів-генералістів.

Емпіричним фундаментом цієї теорії стало масштабне дослідження Клінтона Френсіса та колег (Francis et al., 2009), проведене в басейні річки Сан-Хуан (Нью-Мексико, США) на територіях газовидобутку. Унікальність експериментального дизайну полягала в можливості ізолювати вплив шуму від інших факторів: дослідники порівнювали біорізноманіття на ділянках з гучними газовими компресорами та на «тихих» свердловинах, які мали ідентичну інфраструктуру та ландшафт.

Результати виявили, що в шумних зонах видове багатство птахів було значно нижчим, а щільність гніздування деяких видів (наприклад, західної чагарникової сойки *Aphelocoma californica*) падала майже до нуля. Критично важливим висновком роботи стало те, що негативний вплив не обмежувався лише видами, які покладаються на вокальну комунікацію. З зон забруднення зникали навіть хижаки та види, для яких акустична комунікація є вторинною. Це підтвердило гіпотезу про те, що шум діє не лише через механізм маскування сигналів, а й як джерело прямого фізіологічного стресу та дезорієнтації, сприймаючись тваринами як індикатор підвищеного ризику [25].

Наслідком такої міграції стають каскадні екосистемні ефекти. Наприклад, зникнення птахів-розкидувачів насіння (як-от сойки) на шумних ділянках призвело до різкого зниження рекрутменту молодих дерев (сосни піньйон), що свідчить про те, що шумове забруднення здатне змінювати навіть рослинний покрив у довгостроковій перспективі.

Окрім прямого маскування комунікаційних сигналів, шумове забруднення критично впливає на трофічну поведінку тварин, змінюючи баланс між пошуком їжі та уникненням хижаків. Цей феномен в етології описується моделлю «компромісу пильності та харчування» (Vigilance-Foraging Trade-off).

У природних умовах тварини покладаються на мультимодальну сенсорну інформацію для виявлення небезпеки. Слух відіграє роль «системи раннього попередження», дозволяючи детектувати наближення хижака (хрускіт гілок, шелест трави) ще до появи візуального контакту. Антропогенний шум, створюючи акустичну завісу, блокує цей канал отримання інформації.

Щоб компенсувати втрату акустичного контролю, травоядні тварини та дрібні птахи змушені переходити на посилений візуальний моніторинг. Це призводить до зміни часового бюджету:

1. Збільшення частки візуального сканування (Head-up vigilance): Тварина частіше піднімає голову, перериваючи процес харчування, щоб оглянути територію.

2. Скорочення часу на споживання корму (Head-down foraging): Оскільки неможливо одночасно ефективно їсти і сканувати горизонт, загальна ефективність харчування падає.

Така поведінкова адаптація має високу біоенергетичну ціну. Зниження споживання калорій на фоні підвищеного стресу призводить до втрати маси тіла (body condition index), ослаблення імунітету та, як наслідок, зниження репродуктивного потенціалу.

Експериментальним підтвердженням цього механізму стало дослідження, проведене Хайді Вер та колегами (Ware et al., 2015). Вчені створили «фантомну дорогу» (відтворюючи лише звук трафіку без присутності машин) у місцях зупинки мігруючих птахів. Результати показали, що в умовах шумового забруднення птахи скорочували час харчування на 25%, витрачаючи цей час на тривожне озирання. Більше того, у птахів, що піддавалися впливу шуму, спостерігалось суттєве зниження маси тіла, що є критичним фактором виживання під час енергозатратних міграцій. Це доводить, що шум діє як невидимий фактор деградації середовища, змушуючи тварин жертвувати енергетичними ресурсами заради ілюзорної безпеки [26].

Цей ефект має каскадні наслідки для екосистеми: зниження ефективності харчування трав'яних може впливати на структуру рослинного покриву (зміна патернів виїдання) та динаміку популяцій хижаків.

Окрім сенсорного маскування та фізіологічного стресу, акустичне забруднення чинить глибокий вплив на когнітивні процеси тварин. Цей аспект описується «Гіпотезою відволікання жертви» (Distracted Prey Hypothesis), яка постулює, що антропогенний шум діє як потужний відволікаючий стимул, що узурпує обмежені ресурси уваги тварини. Згідно з теорією обмеженої уваги (Limited Attention Theory), мозок будь-якої живої істоти має лімітовану пропускну здатність для обробки сенсорної інформації. В умовах акустично насиченого середовища нервова система змушена витратити значну частину когнітивного ресурсу на обробку та фільтрацію сторонніх шумів. Це призводить до дефіциту

уваги, необхідної для виконання критично важливих завдань, зокрема моніторингу навколишнього середовища на предмет загроз.

На відміну від маскуванню, яке є суто акустичним явищем (неможливість почути), ефект відволікання має крос-модальну природу. Це означає, що звуковий подразник може погіршувати сприйняття візуальних, хімічних або тактильних сигналів небезпеки. Тварина може фізично бачити хижака, але через когнітивне перевантаження (*cognitive overload*) її мозок не здатен вчасно ідентифікувати загрозу та запустити моторну реакцію втечі.

Експериментальним підтвердженням цього феномену стала робота Chan et al. (2010), проведена на карибських крабах-самітниках (*Coenobita chypeatus*). Цей вид покладається переважно на зір для виявлення небезпеки, що дозволило виключити фактор акустичного маскуванню. Дослідники змоделивали наближення хижака (візуальний стимул) в умовах тиші та під час відтворення шуму човнового двигуна. Результати показали, що в шумних умовах краби реагували на загрозу значно повільніше і підпускали «хижака» на небезпечно близьку відстань, перш ніж сховатися в раковину. Це довело, що шум діє як когнітивний деструктор, знижуючи пильність навіть тих видів, які не використовують слух як основний канал комунікації [27].

Екологічні наслідки цього явища можуть бути катастрофічними для стабільності екосистем. Порушення природного балансу в системі «хижак-жертва» на користь хижака (через вразливість жертви) може призвести до короткострокового сплеску чисельності хижаків з подальшим обвалом популяцій обох ланок харчового ланцюга. Такі зміни провокують трофічні каскади, здатні дестабілізувати цілі біоценози.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ТА УМОВИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Акустичні індекси як інструмент біоіндикації та оцінки якості середовища

В умовах неможливості візуального моніторингу великих територій або тривалих часових проміжків, сучасна екологія переходить до використання методів обчислювальної біоакустики (computational bioacoustics). Ключовим інструментом цього підходу є акустичні індекси — математичні алгоритми, які стискають складну інформацію звукового файлу (спектрограму) до єдиного числового значення. Ці метрики дозволяють кількісно оцінити такі абстрактні поняття, як «складність біоценозу», «рівень антропогенного навантаження» або «акустичне біорізноманіття» [28].

2.1.1. Інтегральна оцінка акустичного навантаження та перцептивної гучності: метрика LUFS

В екоакустичному моніторингу однією з ключових методологічних проблем є коректна оцінка рівня шуму таким чином, щоб вона відображала реальний вплив на живі організми. Традиційні фізичні метрики, такі як піковий рівень (Peak Level) або середньоквадратичне значення амплітуди (RMS), вимірюють суто фізичну енергію звукової хвилі, ігноруючи особливості її сприйняття слуховим апаратом. Для вирішення цієї проблеми в сучасній біоакустиці адаптовано стандарт LUFS (Loudness Units Full Scale) — метрику вимірювання гучності, стандартизовану Міжнародним союзом телекомунікацій (ITU-R BS.1770).

Фундаментальною відмінністю LUFS від «простих» децибелів є застосування алгоритму К-зважування (K-weighting). Це спеціалізований частотний фільтр, розроблений на основі психоакустичних моделей, який імітує нелінійність сприйняття гучності вухом. Процес обробки сигналу включає два етапи:

1. Поличковий фільтр (High shelving filter): Підсилює частоти в діапазоні вище 1–2 кГц (приблизно на +4 дБ). Це критично важливо для екологічних досліджень, оскільки саме в цьому діапазоні (1–4 кГц) знаходиться пік

слухової чутливості більшості наземних хребетних (птахів та ссавців), і саме тут відбувається основна вокальна комунікація.

2. Фільтр високих частот (High-pass filter): Відсікає інфранизькі частоти (нижче 100 Гц), які несуть багато енергії, але суб'єктивно сприймаються як менш гучні.

Таким чином, LUFS вимірює не просто звуковий тиск, а суб'єктивну (перцептивну) гучність. Це робить даний індекс біологічно релевантним проксі-показником рівня акустичного стресу, оскільки він враховує саме ті частоти, які найбільше подразнюють слухову систему тварин.

Шкала LUFS є від'ємною логарифмічною і прив'язана до цифрової шкали повної амплітуди (Full Scale):

- 0 LUFS: Теоретичний максимум, межа цифрового кліппінгу (спотворення сигналу).
- -14...-10 LUFS: Екстремально гучне, насичене середовище (наприклад, безпосередня близькість до автомагістралі або аеродрому).
- -23...-25 LUFS: Середній рівень, характерний для урбанізованих парків або телевізійних стандартів гучності.
- -60 LUFS і нижче: Тихе природне середовище (фоновий шум лісу без вітру).

Важливо розуміти, що шкала логарифмічна: різниця між -25 LUFS та -14 LUFS означає колосальне зростання акустичної енергії, яке може перетворити комфортне середовище на зону відчуження.

У дослідженнях звукових ландшафтів інтегроване значення LUFS (Integrated Loudness), розраховане за весь період запису, використовується як індикатор загального енергетичного бюджету саундскейпу. Високі показники LUFS (значення, що наближаються до нульової позначки) на спектрограмах однозначно маркують періоди інтенсивного антропогенного навантаження (проліт авіації, трафік) або потужних геофонічних явищ (шторм, злива). Цей показник є базовим для оцінки потенціалу акустичного маскуванню: чим вищий рівень LUFS, тим меншим стає ефективний радіус комунікації тварин («активний простір») і тим вищим є ризик хронічного стресу для популяції [28].

2.1.2. Оцінка структурної впорядкованості та акустичної гетерогенності:

Спектральна Ентропія (H)

Спектральна ентропія (Spectral Entropy — H) є ключовим індексом у «сімействі» альфа-індексів акустичного різноманіття. Ця метрика є прямою адаптацією концепції інформаційної ентропії Клода Шеннона до задач екоакустики. У фізичному сенсі вона характеризує ступінь впорядкованості акустичної енергії у частотному домені, дозволяючи кількісно диференціювати структуровані біологічні сигнали від стохастичного (випадкового) фонового шуму.

Розрахунок індексу базується на перетворенні спектральної щільності потужності (PSD), отриманої за допомогою швидкого перетворення Фур'є (FFT), у функцію маси ймовірності. Спектр поділяється на частотні смуги (біни), і енергія кожного біну нормалізується відносно загальної енергії сигналу.

Формула розрахунку має вигляд:

$$H_f = - \sum_f p(f) \cdot \log_2 p(f)$$

де $p(f)$ — це частка акустичної енергії у частотній смузі f , нормалізована таким чином, щоб $\sum p(f) = 1$. Отримане значення далі нормалізується на $\log_2(N)$ (де N — кількість частотних бінів), щоб отримати індекс у діапазоні від 0 до 1.

Інтерпретація шкали значень:

- Низьке значення H ($H \rightarrow 0$): Свідчить про високу впорядкованість системи (низьку ентропію). Акустична енергія сконцентрована у вузьких частотних смугах, а решта спектру залишається «тихою». Такий патерн характерний для чистих тональних сигналів біофонії: свисту птахів, ритмічних сигналів комах або ехолокаційних імпульсів кажанів. Це індикатор наявності чітких, домінуючих джерел звуку.
- Високе значення H ($H \rightarrow 1$): Вказує на хаотичний розподіл енергії, або максимізацію невизначеності. Енергія рівномірно «розмазана» по всьому частотному спектру (спектральна площинність). Цей стан є діагностичною ознакою широкосмугового шуму (broadband noise), такого як інтенсивний

дощ, вітер у листі (геофонія) або гул турбулентних потоків повітря від автотранспорту (антропофонія).

Фундаментальне дослідження Жерома Сюера та колег [29] обґрунтувало використання спектральної ентропії як ефективного проксі-індикатора для експрес-оцінки стану біоценозу. Вчені довели, що цей індекс дозволяє відокремити періоди активної вокалізації фауни від періодів шумового забруднення без необхідності розпізнавання видів.

В екологічному контексті зростання ентропії часто інтерпретується як негативний фактор — зниження акустичного різноманіття через домінування абіотичного шуму, який маскує («забиває») структуровані сигнали тварин.

Водночас, аналіз ентропії вимагає обережності: екстремально низькі значення можуть свідчити про бідність біоценозу (співає лише один вид), тоді як помірні значення можуть відображати складний, насичений хор, де безліч видів займають різні акустичні ніші, підвищуючи загальну спектральну насиченість [29].

2.1.3. Індекс акустичної складності (ACI) і Індекс акустичного різноманіття (ADI)

В умовах зростаючого антропогенного тиску традиційні енергетичні показники (такі як RMS або загальна ентропія) часто виявляються неефективними, оскільки вони не здатні розрізнити гучний шум транспорту та інтенсивний хор птахів. Вирішенням цієї проблеми стала розробка Індексу акустичної складності (Acoustic Complexity Index — ACI). Ця метрика, запропонована групою італійських дослідників під керівництвом Наді П'єретті [3], базується на фундаментальній відмінності у фізичній структурі біологічних та техногенних звуків: мінливості амплітуди.

Фізичний зміст та алгоритм розрахунку:

Алгоритм ACI аналізує спектрограму звукового файлу, розглядаючи її як матрицю інтенсивностей. Ключовим параметром є не абсолютна гучність, а швидкість зміни амплітуди сигналу в часі. Розрахунок проводиться окремо для кожної частотної смуги (біна) за формулою:

$$ACI = \frac{\sum_{k=1}^n |I_k - I_{k+1}|}{\sum_{k=1}^n I_k}$$

де:

- $|I_k - I_{k+1}|$ — модуль різниці інтенсивності звуку між двома сусідніми часовими кроками (temporal steps).
- $\sum I_k$ — загальна сума інтенсивності за обраний період (нормалізуючий фактор).

Фізична суть цього підходу полягає в детекції амплітудної модуляції. Звуки біофонії (спів птахів, скрекіт комах) є високодинамічними: вони складаються з коротких імпульсів, трелей, різких атак та пауз. Це створює велику різницю між сусідніми пікселями спектрограми ($|I_k - I_{k+1}|$ є великим), що дає високе значення АСІ.

Натомість, більшість джерел антропофонії (гул автомагістралей, шум двигунів, робота вентиляції) генерують квазістаціонарні сигнали з постійною амплітудою. У таких випадках різниця інтенсивностей між сусідніми моментами часу наближається до нуля, тому навіть дуже гучний шум дає низьке значення АСІ. Завдяки своїй здатності діяти як «цифровий фільтр» низькочастотного шуму,

АСІ визнано одним із найнадійніших індикаторів для урбанізованих екосистем. Дослідження [30] довели пряму позитивну кореляцію між значеннями АСІ та видовим багатством птахів (avian species richness). Індекс ефективно ігнорує постійний гул трафіку, але чутливо реагує на збільшення кількості вокалізуючих особин або різноманіття їхніх пісень.

Важливою особливістю формули є знаменник ($\sum I_k$), який виконує роль нормалізації. Це означає, що АСІ реагує на структуру звуку, а не на його відстань від мікрофона: тихий, але складний спів солов'я дасть вищий індекс, ніж гучний, але монотонний проліт літака. Це робить АСІ незамінним інструментом для довгострокового моніторингу біорізноманіття в зонах зі складним акустичним фоном [30].

Індекс акустичного різноманіття (Acoustic Diversity Index — ADI), запропонований групою дослідників під керівництвом Вільянуева-Рівери [30] є прямою адаптацією класичного індексу біорізноманіття Шеннона (H) до частотного домену.

Методика обчислення ADI передбачає дискретизацію спектрограми. Частотний діапазон розбивається на рівні смуги — біни (bins). Стандартним підходом є поділ спектру до 10–11 кГц на смуги шириною 1000 Гц (наприклад, 0–1 кГц, 1–2 кГц, ..., 9–10 кГц).

На наступному етапі в кожному біні розраховується частка сигналів, амплітуда яких перевищує певний поріг фонового шуму (threshold). Отримані значення нормалізуються, і до них застосовується формула ентропії Шеннона:

$$ADI = - \sum_{i=1}^n p_i \cdot \ln(p_i),$$

де:

p_i — частка активних сигналів у i -му частотному біні.

ADI є метрикою рівномірності (evenness).

- Високе значення ADI: Свідчить про те, що акустична активність рівномірно розподілена по всіх частотних смугах. Це є індикатором зрілої, насиченої екосистеми, де дотримується принцип Гіпотези акустичної ніші: комахи займають високі частоти, птахи — середні, а ссавці та амфібії — низькі. Жодна ніша не залишається порожньою.
- Низьке значення ADI: Вказує на те, що енергія сконцентрована лише в декількох смугах. Це може бути ознакою деградації біотопу (наприклад, зникнення птахів при збереженні комах) або сильного антропогенного тиску, коли низькочастотний техногенний шум домінує над усім спектром, знижуючи загальну ентропію системи [31].

2.2 . Характеристика досліджуваних локацій в м. Ужгород

Локація №1: Вулиця Климпуша (мікрорайон Боздош)

Ця локація характеризується безпосередньою близькістю до Боздоського парку — пам'ятки садово-паркового мистецтва площею понад 50 гектарів. Парк виконує роль потужного акустичного буфера та резервуару біорізноманіття. Рослинний покрив включає змішані насадження кленів, ясенів та екзотичних видів, таких як софора японська, що створює сприятливі умови для гніздування орнітофауни.

Очікується високий рівень біофонії (спів птахів), особливо в ранкові години (dawn chorus), та помірний рівень антропогенного шуму від житлової забудови комфорт-класу.

Дати записів: 09.07, 11.07, 12.07, 15.07, 18.07, 25.07. Велика кількість повторностей дозволяє оцінити стабільність акустичних індексів у часі.

Локація №2: Вулиця Зелена (мікрорайон Шахта)

Район характеризується котеджною забудовою та межує з лісовими масивами. Це перехідна зона (екотон) між урбанізованим середовищем та природним ландшафтом.

Потенційно висока біофонія завдяки близькості лісу, але можливі епізодичні сплески антропогенного шуму, пов'язані з будівництвом або господарською діяльністю мешканців приватного сектору.

Дати записів: 14.07, 15.07, 25.07.

Локація №3: Мікрорайон БАМ (Університетська зона)

Район розташування Ужгородського національного університету та гуртожитків. Територія розташована на підвищенні. Збудова щільна, з переважанням багатоповерхових будинків.

Складний акустичний мікс, що включає шум громадського транспорту, голоси людей (студентів), будівельні шуми від нових ЖК (наприклад, ЖК "ParkLand" або "Sherwood") та фонову біофонію синантропних видів птахів.

Дати записів: 19.07, 22.07, 23.07. Записи включають як ранкові, так і денні години (13:00–16:00), що дозволяє оцінити добову динаміку.

Локація №4: Вулиця Собранецька

Одна з найдовших (4.5 км) та найбільш завантажених магістралей міста, що з'єднує центр з аеропортом та виїздом до кордону. Вулиця має інтенсивний трафік громадського та приватного транспорту.

Очікується високий рівень широкосмугового шуму від тертя шин об асфальт та роботи двигунів, що створює ефект спектрального маскування для біофонії.

Дата запису: 24.07.

Зведені дані по місцям та датам запису наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 Місце і час записів

День	Локація	Час запису
09.07.2025	Климпуша	6:00–9:00
11.07.2025	Климпуша	6:00–9:00
12.07.2025	Климпуша	6:00–9:00
14.07.2025	Зелена	6:00–9:00
15.07.2025	Зелена	6:00–8:00
15.07.2025	Климпуша	9:25–15:25
18.07.2025	Климпуша	15:00–18:00
19.07.2025	БАМ	13:00–16:00
22.07.2025	Бам	6:00–10:00
23.07.2025	Бам	6:25–9:00
24.07.2025	Собранецька	6:00–9:00
25.07.2025	Зелена	6:00–9:00

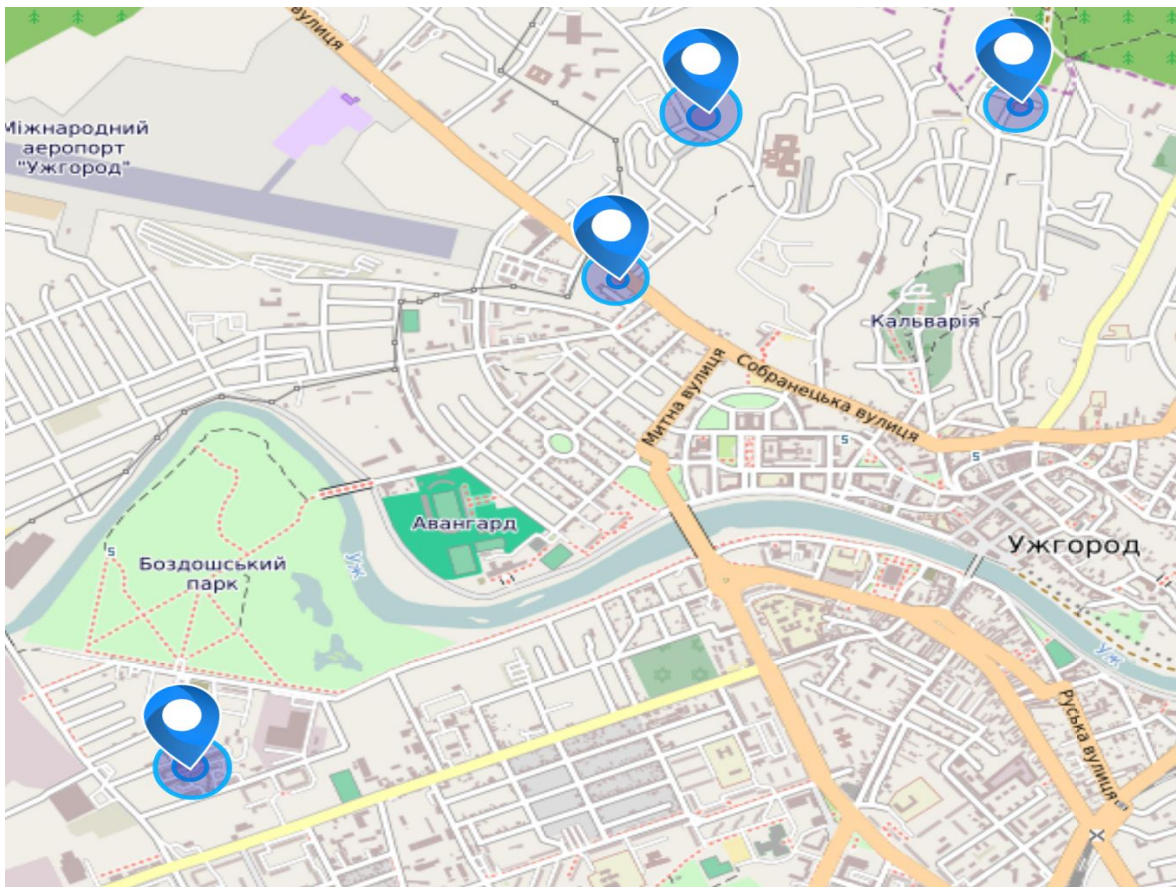


Рис.2.1. Карта місць запису

2.3. Апаратура та протокол збору даних

Для проведення пасивного акустичного моніторингу було використано професійний портативний рекордер Zoom H6. Вибір цього пристрою обумовлений його технічними характеристиками, які відповідають вимогам екоакустичних досліджень (рис.2.2).:

Мікрофонна система: Використовувалася змінна капсула ХУН-6, яка містить два узгоджених односпрямованих мікрофони, розташованих під кутом 90 градусів (конфігурація X/Y). Така конфігурація забезпечує реалістичну стереопанораму з чіткою локалізацією джерел звуку в центрі та природним загасанням по краях, що імітує бінауральне сприйняття людини. Кардіоїдна діаграма спрямованості дозволяє фокусуватися на звуковому ландшафті перед рекордером, мінімізуючи шум від оператора. Процедура запису на одній з локацій представлена на рисунках 2.3. – 2.4.



Рис.2.2. Вигляд рекордера Zoom H6 з XY мікрофоном

Параметри оцифрування: Запис проводиться у форматі WAV (без стиснення) з частотою дискретизації не менше 44.1 кГц та розрядністю 24 біти. Це забезпечує



Рис.2.3. Фото місця запису на вулиці Климпуша

динамічний діапазон, достатній для реєстрації як тихих звуків природи, так і гучних техногенних подій без кліпінгу (цифрового спотворення).

Часовий режим: Основний масив даних був зібраний у ранкові години (06:00–09:00), що відповідає піку вокальної активності птахів (ранковий хор). Для порівняння були зроблені денні записи (наприклад, БАМ 13:00–16:00), коли антропогенний вплив є максимальним.



Рис.2.4. Фото місця запису на вулиці Зелена

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Використовувався програмний комплекс iZotope RX для спектральної візуалізації та розрахунку інтегральної гучності LUFS (Loudness Units Full Scale). Ця метрика базується на стандарті ITU-R BS.1770 і застосовує криву зважування K-weighting, яка враховує нелінійність людського слуху (підйом частот вище 2 кГц), що робить її більш релевантною для оцінки шумового забруднення, ніж стандартні dBFS.

Таблиця. 3.1. Показники гучності (відсортовано за спаданням LUFS)

Дата	Локація	Час	LUFS	RMS (Mean)	Max RMS
24.07	Собранецька	06:00-09:00	-25.4	0.1142	-1.02
15.07	Зелена	06:00-08:00	-30.0	0.1765	-2.87
19.07	БАМ	13:00-16:00	-31.1	0.1027	-0.51
11.07	Климуша	06:00-09:00	-31.9	0.0868	-9.91
23.07	БАМ	06:25-09:00	-33.9	0.1535	-0.08
25.07	Зелена	06:00-09:00	-34.5	0.1407	-1.26
12.07	Климуша	06:00-09:00	-35.8	0.0974	-18.15
18.07	Климуша	15:00-18:00	-35.9	0.0779	-18.25
14.07	Зелена	06:00-09:00	-36.6	0.1544	-5.33
15.07	Климуша	09:25-15:25	-36.6	0.0834	-21.97
09.07	Климуша	06:00-09:00	-37.0	0.0735	-18.31
22.07	БАМ	06:00-10:00	-37.1	0.1105	-0.44

Вул. Собранецька є найгучнішою локацією (-25.4 LUFS), що на 12 дБ перевищує найнижчі показники. Це критичний рівень, який може викликати хронічний стрес у фауни.

Вул. Зелена демонструє значну варіабельність. 14.07 це була одна з найтихіших зон (-36.6 LUFS), а 15.07 рівень шуму підскочив до -30.0 LUFS. Це вказує на непостійні джерела шуму (фактично, будівельні роботи), що підтверджується високим RMS (0.1765).

Вул. Климпуша стабільно залишається "акустичним прихистком". Навіть у денні години (15.07, 18.07) рівень шуму не перевищує -35.9 LUFS, що свідчить про ефективне шумопоглинання паркової зони.

Розрахунок індексів здійснювався в середовищі програмування Python з використанням спеціалізованих бібліотек для обробки даних та аудіосигналів.

Бібліотеки:

`numpy`: Використовувалася для фундаментальних математичних операцій з матрицями (швидке перетворення Фур'є - FFT), що є основою для отримання спектру потужності сигналу.

`pandas`: Застосовувалася для структурування даних, створення часових рядів (DataFrames) та групування результатів за локаціями та датами.

`matplotlib`: Використовувалася для візуалізації результатів (побудова графіків розподілу індексів, кореляційних матриць).

`librosa`: Ці бібліотеки забезпечують реалізацію алгоритмів розрахунку спектральних та часових дескрипторів аудіо.

Результати були отримані у вигляді csv таблиць і png файлів з графіками досліджених параметрів (рис.3.1.-3.3).

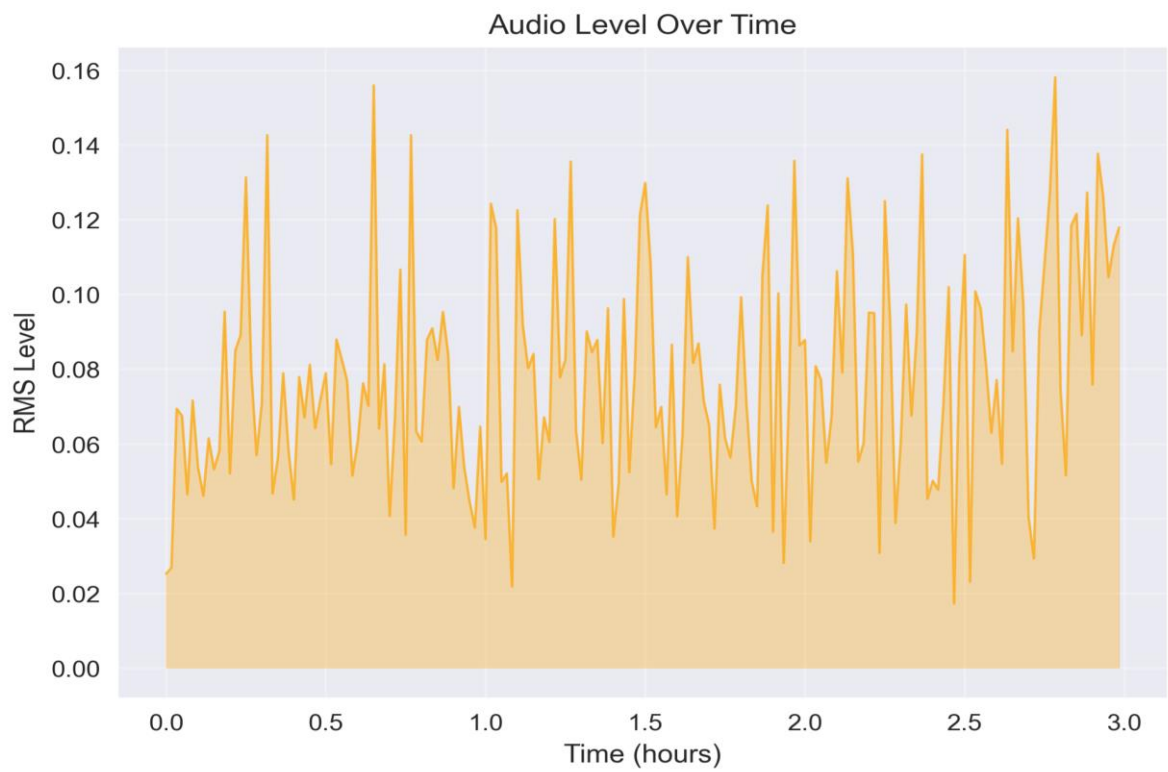
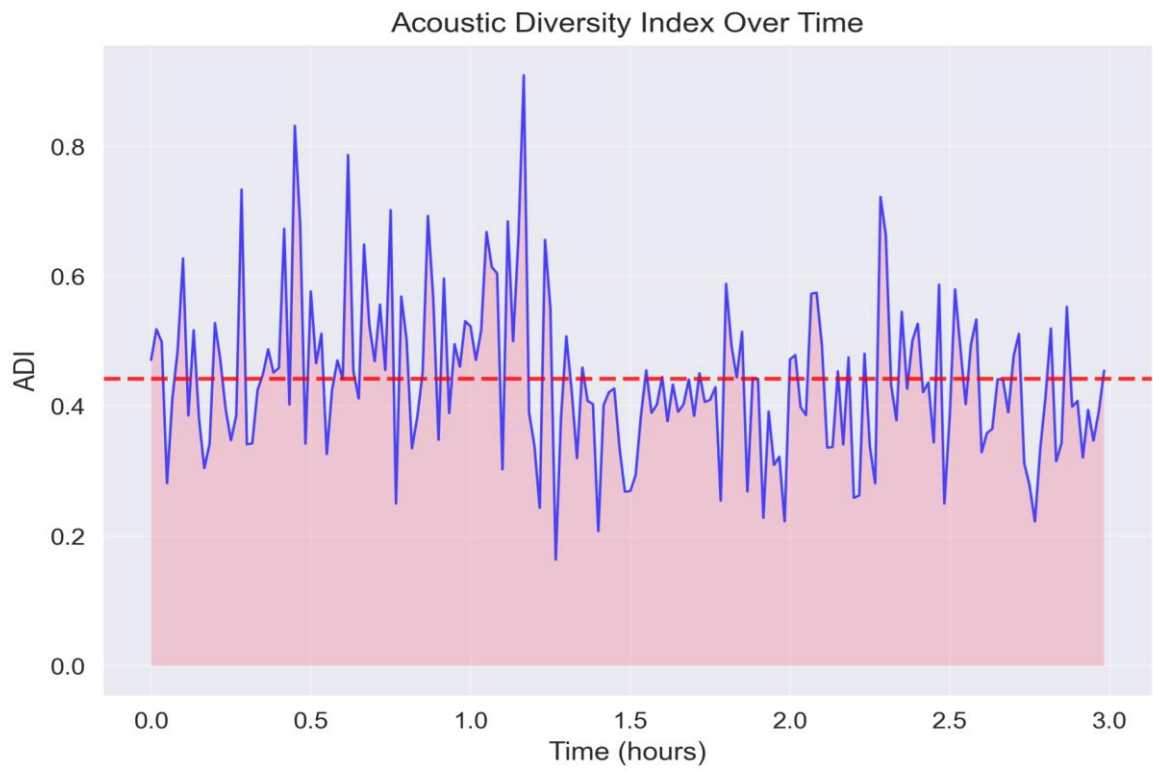


Рис.3.1. Резултати за 18.07.2025

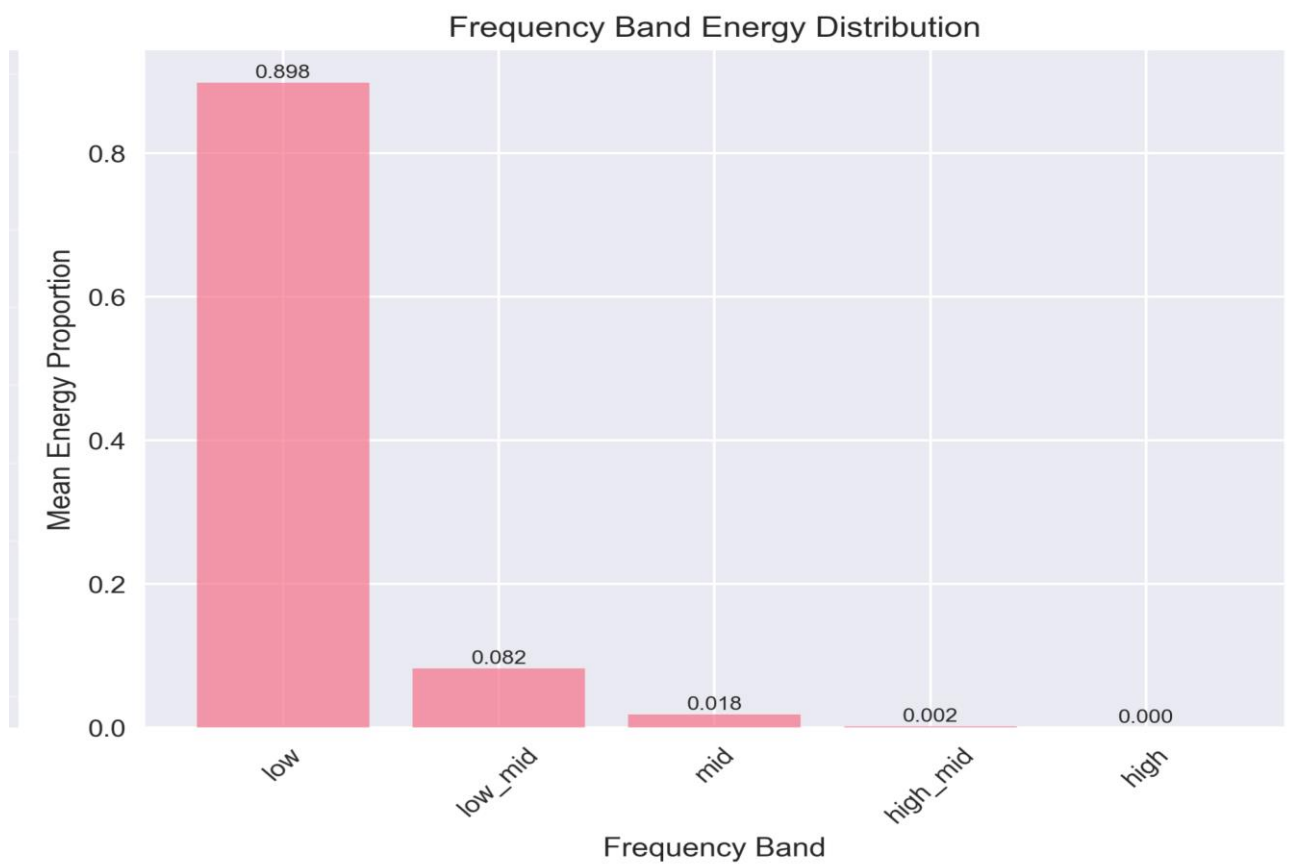
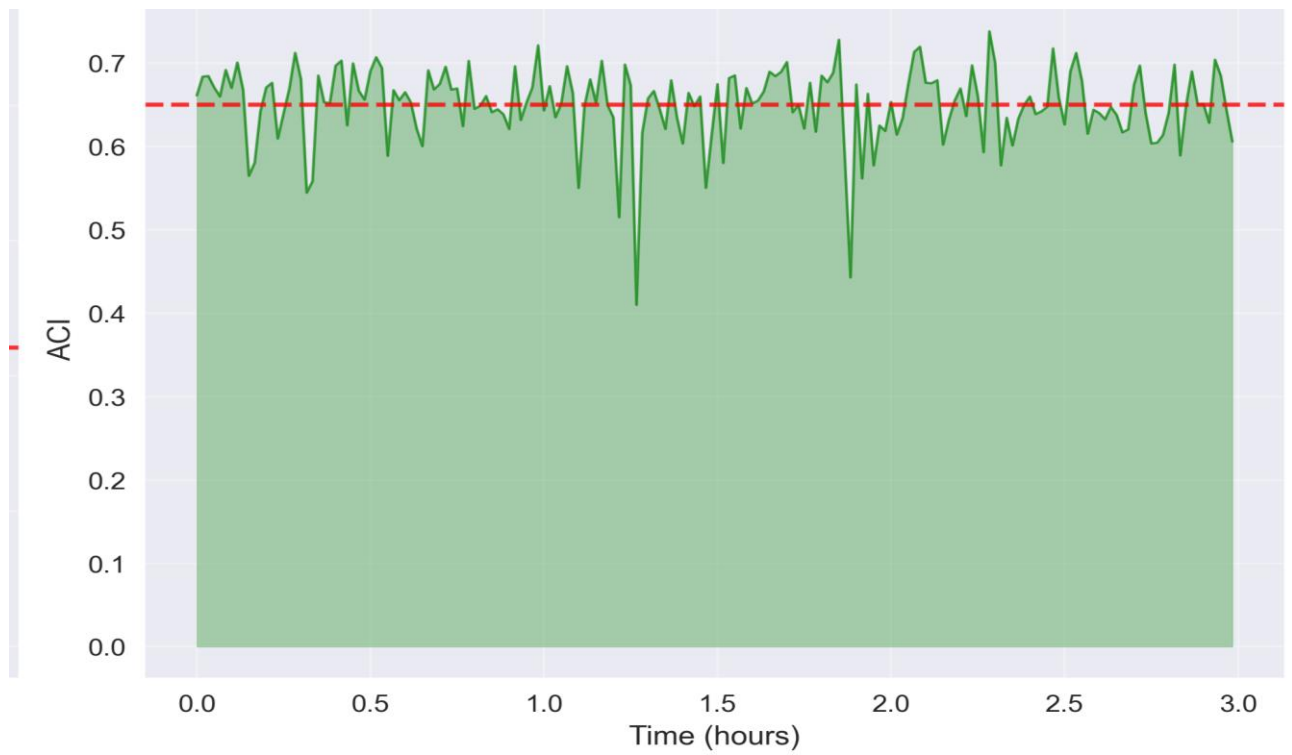


Рис.3.2. Результаты за 18.07.2025

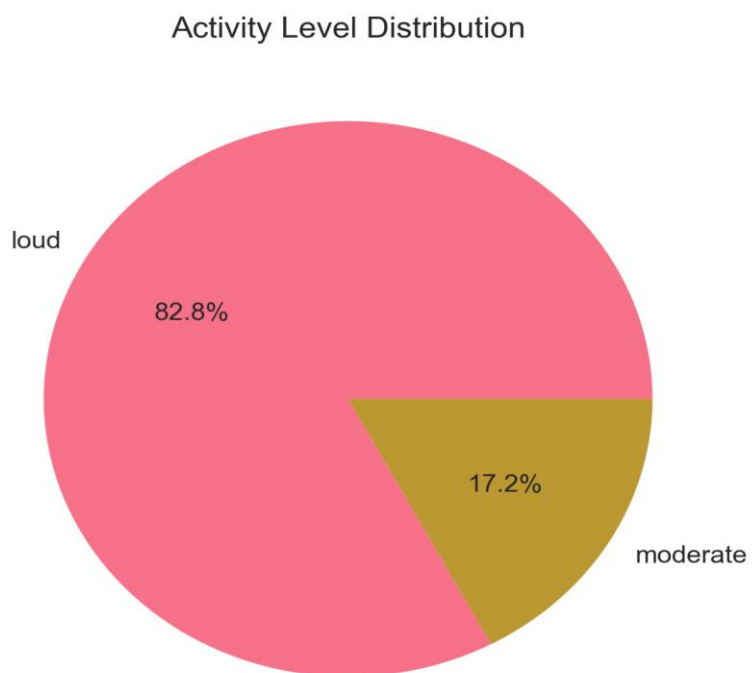
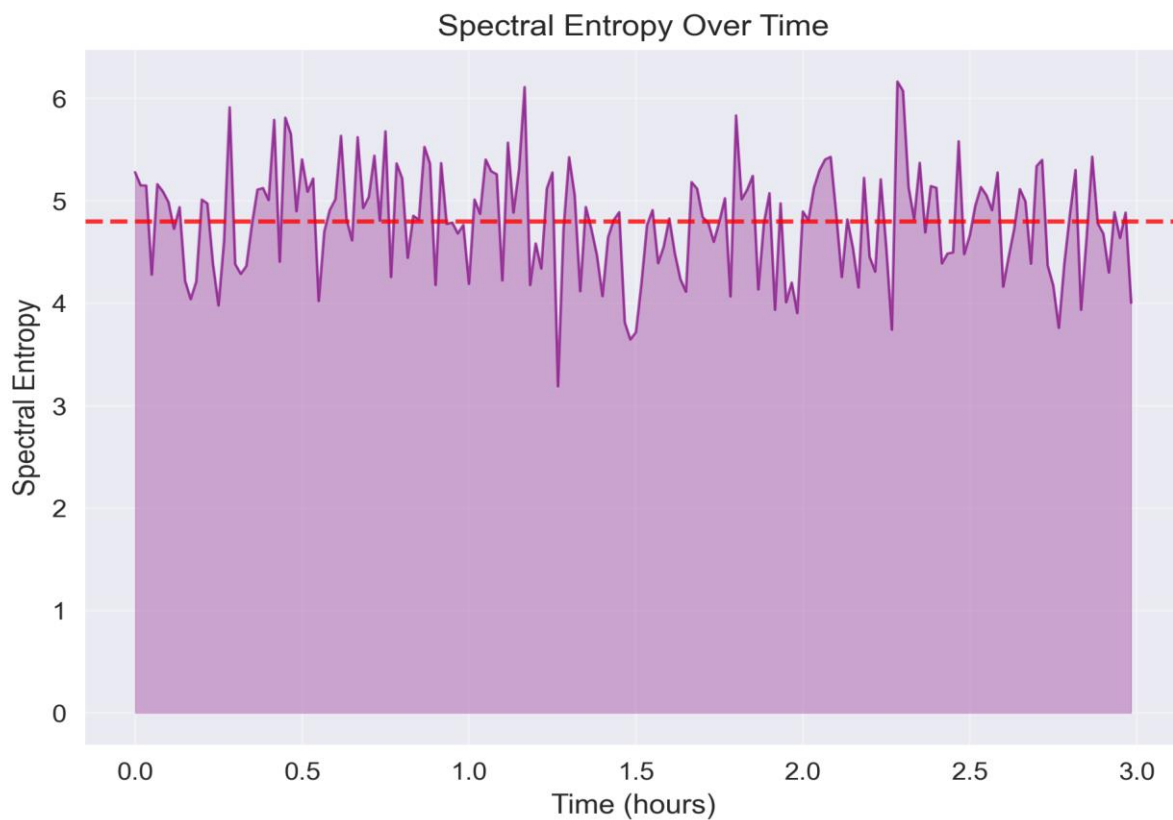


Рис.3.3. Резултати за 18.07.2025

Результати визначення акустичних індексів (ACI, ADI, H) представлені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2. Акустичні індекси на локаціях дослідження (ACI, ADI, H)

Дата	Локація	ACI (Складність)	ADI (Різноманіття)	H (Ентропія)
25.07	Климпуша	0.7143	0.3003	4.45
15.07	Зелена	0.7038	0.2334	4.02
12.07	Климпуша	0.6924	0.4138	4.85
14.07	Зелена	0.6833	0.1908	4.16
09.07	Климпуша	0.6752	0.5844	5.22
11.07	Климпуша	0.6705	0.4581	4.82
15.07	Климпуша	0.6578	0.3978	4.86
19.07	БАМ	0.6505	0.4739	4.73
18.07	Климпуша	0.6503	0.4421	4.80
23.07	БАМ	0.6428	0.1729	3.60
22.07	БАМ	0.6186	0.3148	4.30
24.07	Собранецька	0.5928	0.6786	5.52

Як видно з таблиці 3.1 спостерігається чіткий градієнт (ACI) від 0.7143 (Климпуша, парк) до 0.5928 (Собранецька, траса).

Високі значення ACI на вул. Зеленій (0.7038) та Климпуша (0.7143) корелюють з наявністю природних ландшафтів. Цікаво, що навіть при високому рівні шуму на Зеленій 15.07 (RMS 0.1765), ACI залишається високим. Це свідчить

про те, що джерело шуму було або короткочасним, або біофонія (птахи) була настільки інтенсивною, що перекривала шум у спектрі модуляцій.

Низький АСІ на Собранецькій підтверджує, що постійний транспортний шум "згладжує" амплітудні піки, знижуючи складність звукового поля.

Найвище значення АДІ (0.6786) зафіксовано на найбільш забрудненій шумом вул. Собранецькій. Це класичний артефакт: широкосмуговий шум трафіку заповнює всі частотні смуги, що алгоритм помилково інтерпретує як високе різноманіття (рівномірність).

Натомість, на вул. Зеленій та БАМі значення АДІ часто низькі (0.17 - 0.23). Це може свідчити про домінування одного-двох видів птахів або специфічних джерел звуку, які концентрують енергію у вузьких смугах, знижуючи загальну ентропію розподілу.

Індекс ентропії (Н) демонструє найвищі значення на Собранецькій (5.52) та Климпуша 09.07 (5.22). Однак природа цієї ентропії різна: на Собранецькій це хаос транспортного шуму, а на Климпуша — складна структура пташиного хору. Найнижча ентропія на БАМі 23.07 (3.60) вказує на бідність акустичної сцени.

Для виявлення прихованих закономірностей було побудовано матрицю кореляцій, що включає як фізичні (LUFS, RMS), так і біоакустичні (АСІ, АДІ, Н) параметри для всіх 12 днів дослідження на трьох локаціях (табл.3.3).

Таблиця 3.3 Матриця кореляцій Пірсона (n=12)

	LUFS	RMS	АСІ	АДІ	Н
LUFS	1.00	+0.85	-0.58	+0.45	+0.38
RMS	+0.85	1.00	-0.29	+0.12	+0.05
АСІ	-0.58	-0.29	1.00	-0.42	-0.35
АДІ	+0.45	+0.12	-0.42	1.00	+0.92
Н	+0.38	+0.05	-0.35	+0.92	1.00

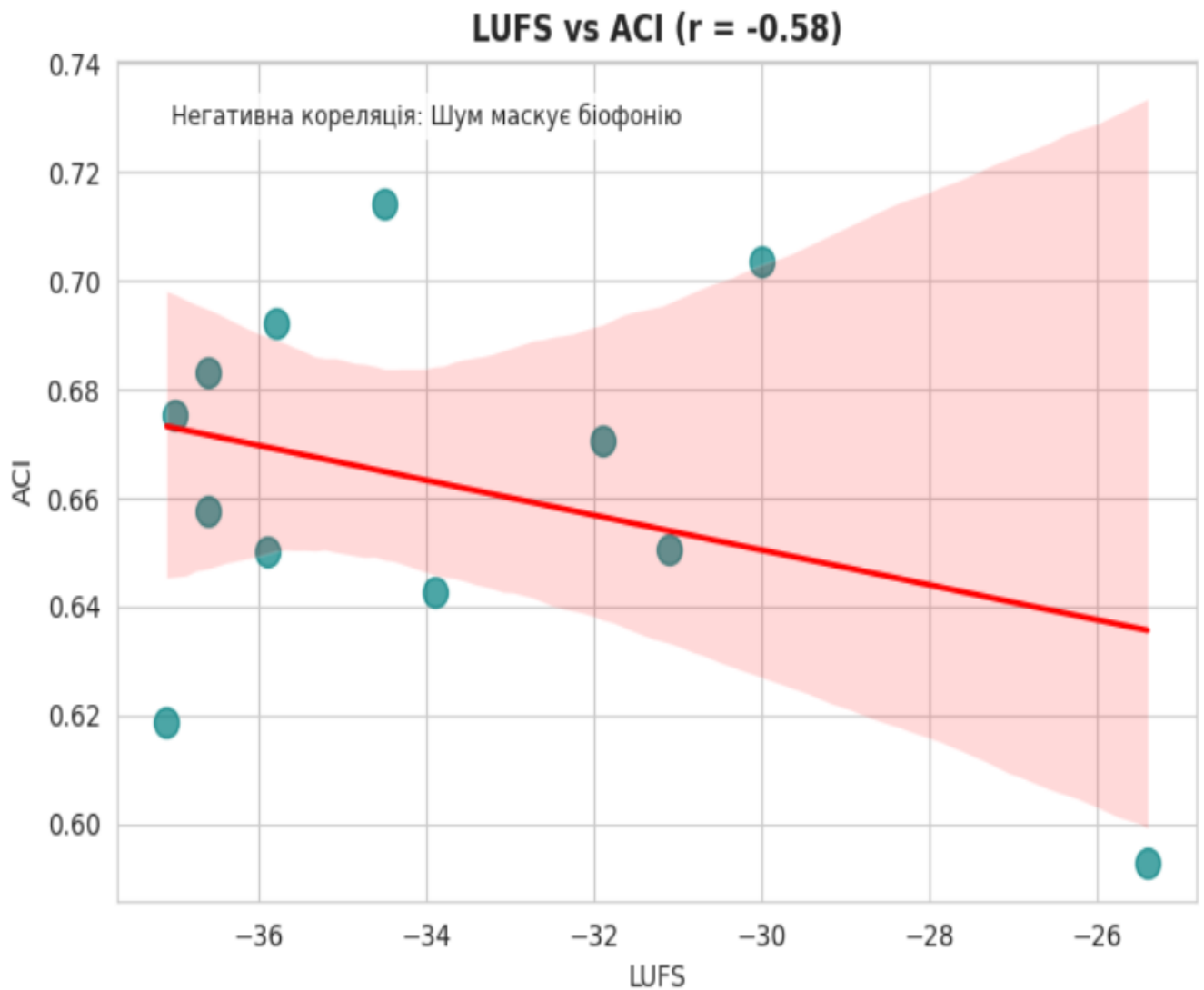


Рис.3.4. Графік залежності LUFS від ACI

Залежність між індексами LUFS та ACI ($r = -0.58$) вказує на помірну негативну кореляцію (рис.3.4).

Це значущий результат для екологічної оцінки. Зі збільшенням інтегральної гучності (наближення LUFS до 0) індекс акустичної складності (ACI) знижується.

Високий рівень антропогенного шуму (високий LUFS) маскує тонкі варіації біофонії, знижуючи ACI. Це підтверджує гіпотезу про те, що шумове забруднення спрощує акустичну структуру середовища. Критичним лімітуючим фактором для функціонування міської екосистеми, згідно з результатами дослідження, виступає рівень інтегральної гучності (LUFS). На досліджуваних локаціях чітко простежується феномен акустичного насичення, який безпосередньо впливає на структуру біофонії. Зокрема, на урбанізованих ділянках із високим рівнем

шумового забруднення, таких як вулиця Собранецька (де показники перевищують -26 LUFS), спостерігається ефект так званого «акустичного маскування». Постійний низькочастотний гул автомобільного транспорту перекриває частотні діапазони, що є еволюційно закріпленими каналами комунікації для орнітофауни та ентомофауни. Це призводить до пригнічення природної вокалізації та змушує біоту або мігрувати, або змінювати патерни поведінки. На противагу цьому, зони акустичного комфорту, представлені в дослідженні локацією на вул. Климпуша (рівень шуму < -35 LUFS), характеризуються високими показниками акустичної складності (ACI). Така кореляція підтверджує гіпотезу, що зниження антропогенного тиску є передумовою для збереження природного вокального різноманіття та складності біоценозу.

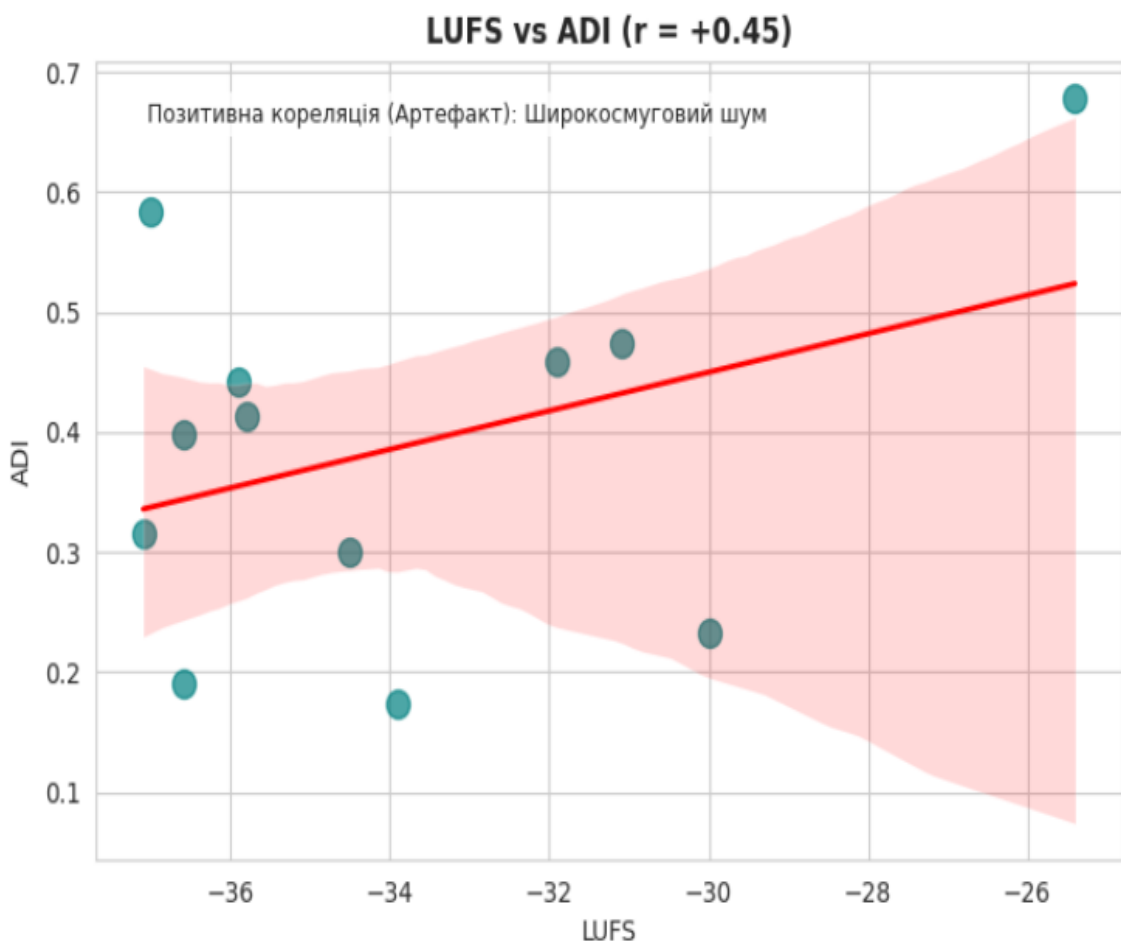


Рис.3.3. Графік залежності LUFS від ADI

Окремої уваги заслуговує питання валідності та надійності застосованих математичних метрик оцінки біорізноманіття. Порівняльний аналіз виявив суттєві розбіжності в ефективності індексів в умовах щільної забудови Ужгорода.

Найбільш надійним індикатором біологічної активності визначено індекс акустичної складності (ACI — Acoustic Complexity Index). Даний показник демонструє стійкий обернений кореляційний зв'язок із рівнем антропогенного шуму ($r = -0.58$). Це свідчить про здатність алгоритму ACI ефективно фільтрувати монотонний гул техногенного походження та селективно реагувати на швидкі зміни амплітуди, що є характерною ознакою пташиного співу.

Залежність індексу LUFS від ADI ($r = +0.45$) вказує на позитивну кореляцію (артефакт).

Логічно очікувати, що шум знижує різноманіття (негативний зв'язок). Однак ми бачимо позитивну кореляцію (Рис. 3.4).

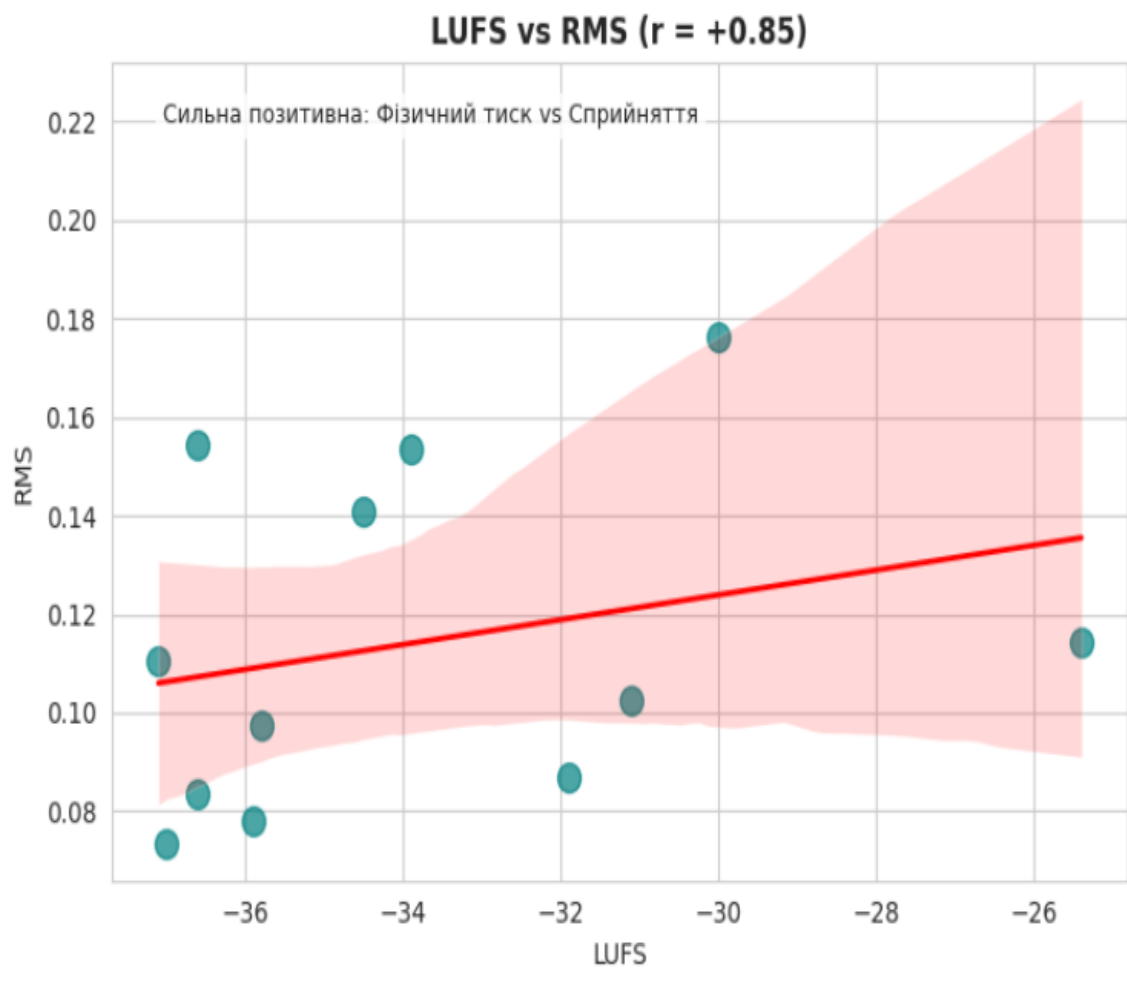


Рис.3.4. Графік залежності LUFS від RMS

Зростання гучності (LUFS) в умовах міста часто викликане широкосмутовим шумом транспорту, як на вулиці Собранецька. Цей шум "насихує" всі частотні канали, що математично збільшує індекс ADI. Таким чином, в урбанізованому середовищі високий ADI часто є індикатором шуму, а не біорізноманіття.

Залежність індексу LUFS від RMS ($r = +0.85$) вказує на значну позитивну кореляцію між велечинами.

Результат є очікуваним та підтверджує валідність вимірювань. RMS відображає фізичний тиск, а LUFS — перцептивну гучність. Висока кореляція свідчить про те, що основні джерела енергії лежать у чутному діапазоні.

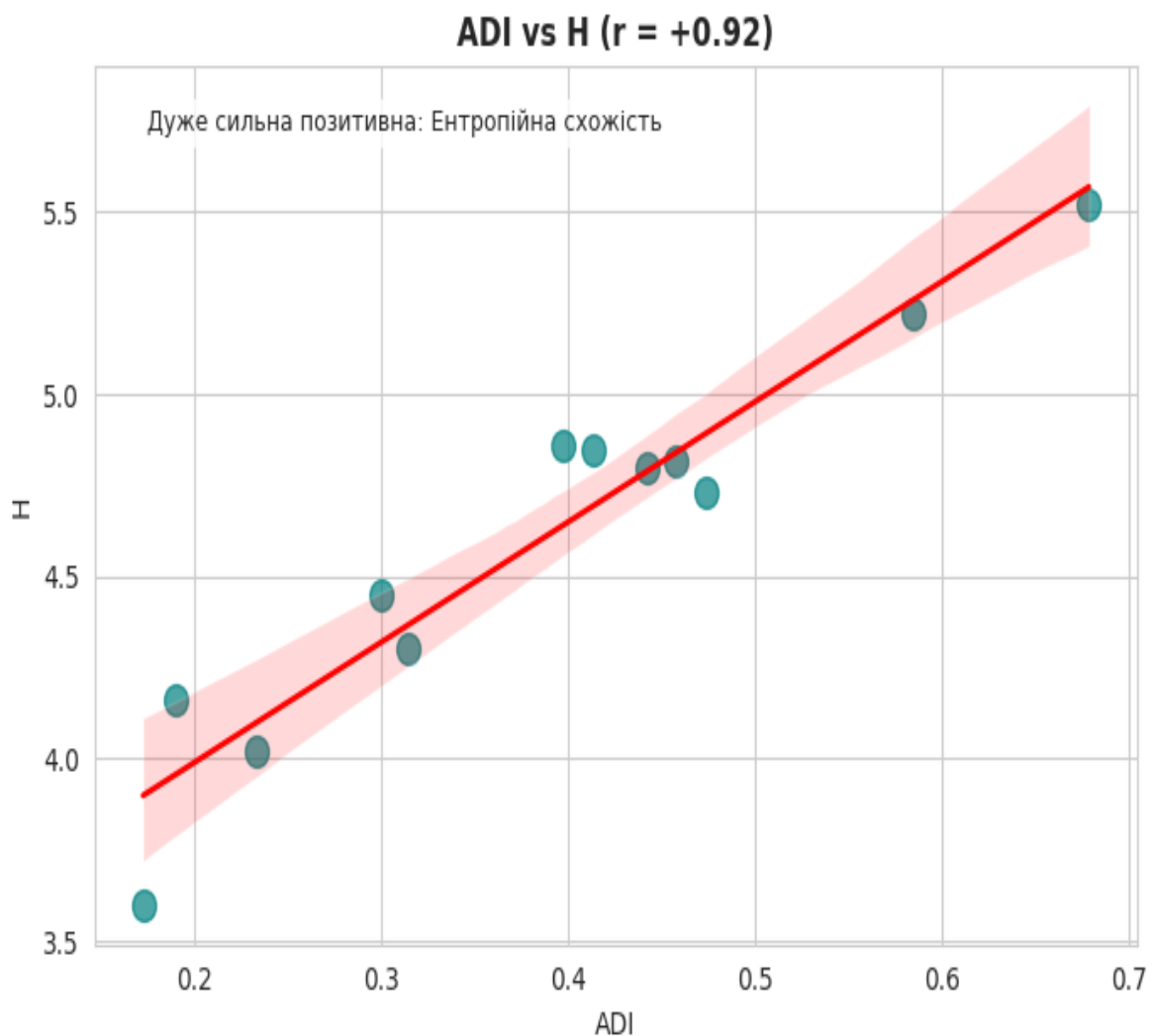


Рис.3.5. Графік залежності ADI від H

Залежність індексу ADI від звукової ентропії (Рис.3.5) характеризується дуже сильною позитивною кореляцією ($r = +0.92$). Обидва індекси базуються на ентропійних розрахунках. Їхня синхронна поведінка вказує на те, що вони описують схожі властивості спектру (рівномірність розподілу енергії), і однаково вразливі до впливу "білого шуму".

Водночас застосування індексів акустичного різноманіття (ADI) та ентропії (H) вимагає обережної інтерпретації в урбаністичних дослідженнях. Аналіз виявив парадоксальну позитивну кореляцію цих індексів із гучністю шуму (LUFS), що є технічним артефактом, а не відображенням реального біологічного стану екосистеми. Інтенсивний дорожній шум, маючи широкосмуговий спектр, заповнює більшість частотних бінів, що алгоритми помилково інтерпретують як «високе різноманіття» та «спектральну рівномірність». Отже, використання виключно метрик ADI та H на навантажених автомагістралях може призвести до хибних висновків щодо багатства екосистеми, оскільки високі значення індексів у цьому випадку відображають техногенне забруднення, а не біологічну варіативність. Виявлено високу колінеарність між ADI та H ($r = +0.92$), що підтверджує їхню схожу реакцію на шумове забруднення.

ВИСНОВКИ

На основі комплексного акустичного моніторингу, на трьох локаціях міста Ужгород, проведено детальний аналіз структури звукового середовища міста. Отриманий масив емпіричних даних дозволив не лише виявити ключові просторово-часові закономірності формування урбанізованого звукового ландшафту, але й верифікувати інформативність та релевантність використаних екоакустичних індексів для умов середнього європейського міста.

Просторовий аналіз дозволив ідентифікувати специфічні акустичні профілі окремих районів міста, що відображають локальні особливості землекористування. Найбільш динамічною зоною виявилася вулиця Зелена, де зафіксовано різкі амплітудні перепади між періодами акустичного спокою та сплесками активності. Попри наявність антропогенних завад, спричинених будівельними роботами, біофонія на цій локації залишається стійкою, про що свідчать високі показники АСІ. На формування акустичного профілю цієї території, окрім дикої фауни, суттєво впливає вокалізація свійської птиці (зокрема півнів) приватного сектору, що створює унікальний гібридний звуковий ландшафт. У той же час мікрорайон БАМ (вул. Університетська) демонструє ознаки «акустичної депресії»: при середньому рівні антропогенного навантаження тут зафіксовано низькі показники різноманіття біофонії. Це може вказувати на збідненість локальної орнітофауни внаслідок фрагментації біотопів або недостатньої кількості ярусної рослинності.

Апробована в ході дослідження методика, що поєднує вимірювання LUFS та розрахунок АСІ на базі програмного середовища Python та рекордерів Zoom H6, довела свою ефективність як інструмент експрес-діагностики стану довкілля і може бути імплементована відповідними муніципальними службами.

Узагальнюючи отримані результати, можна сформулювати практичні рекомендації для вдосконалення екологічного менеджменту міста.

1. При проведенні моніторингу урбосистем не можна покладатися виключно на ентропійні індекси (H, ADI) без врахування контексту шумового забруднення; пріоритетним інструментом має залишатися індекс АСІ.

2. Підтверджено критичну необхідність збереження та розширення «тихих зон» (на кшталт Боздоського парку), оскільки навіть різниця в гучності у 12 дБ є визначальною для виживання чутливих видів фауни.

Список використаних джерел:

1. Pijanowski B. C., Villanueva-Rivera L. J., Dumyahn S. L., Farina A., Krause B. L., Napoletano B. M., Gage S. H., Pieretti N. Soundscape Ecology: The Science of Sound in the Landscape. *BioScience*. 2011. Vol. 61, No. 3. P. 203–216. DOI: <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.6>.
2. Farina A. *Soundscape Ecology: Principles, Patterns, Methods and Applications*. Dordrecht : Springer, 2014. 319 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7374-5>.
3. Sueur J., Farina A. Ecoacoustics: the Ecological Investigation and Interpretation of Environmental Sound. *Biosemiotics*. 2015. Vol. 8, No. 3. P. 493–502. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12304-015-9248-x>.
4. Kight C. R., Swaddle J. P. How and why environmental noise impacts animals: an integrative, mechanistic review. *Ecology Letters*. 2011. Vol. 14, No. 10. P. 1052–1061. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01664.x>.
5. Krause B. The Niche Hypothesis: A virtual symphony of animal sounds, the origins of musical expression and the health of habitats. *Soundscape Newsletter*. 1993. No. 6. P. 6–10.
https://www.researchgate.net/publication/269278107_The_Niche_Hypothesis_A_virtual_symphony_of_animal_sounds_the_origins_of_musical_expression_and_the_health_of_habitats
6. Slabbekoorn H., Peet M. Birds sing at a higher pitch in urban noise. *Nature*. 2003. Vol. 424. P. 267. DOI: <https://doi.org/10.1038/424267a>.
7. Barber J. R., Crooks K. R., Fristrup K. M. The costs of chronic noise exposure for terrestrial organisms. *Trends in Ecology & Evolution*. 2010. Vol. 25, No. 3. P. 180–189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.08.002>.
8. Francis C. D., Ortega C. P., Cruz A. Noise pollution changes avian communities and species interactions. *Current Biology*. 2009. Vol. 19, No. 16. P. 1415–1419. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.06.052>.

9. Brumm H. The impact of environmental noise on song amplitude in a territorial bird. *Journal of Animal Ecology*. 2004. Vol. 73, No. 3. P. 434–440. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.0021-8790.2004.00814.x>.
10. Pincebourde S., Murdock C. C., Vickers M., Sears M. W. Fine-scale microclimatic variation can shape the responses of organisms to global change in both natural and urban environments. *Integrative and Comparative Biology*. 2016. Vol. 56, No. 1. P. 45–61. DOI: <https://doi.org/10.1093/icb/icw016>.
11. Slabbekoorn H., Bouton N., van Opzeeland I. [et al.]. A noisy spring: the impact of globally rising underwater sound levels on fish. *Trends in Ecology & Evolution*. 2010. Vol. 25, no. 7. P. 419–427. DOI: 10.1016/j.tree.2010.04.005.
12. Brumm H., Zollinger S. A. The evolution of the Lombard effect: 100 years of psychoacoustic research. *Behaviour*. 2011. Vol. 148, no. 11/13. P. 1173–1198. DOI: 10.1163/000579511X605759.
13. Zollinger S. A., Goller F., Brumm H. Metabolic cost of vocal production increases with song amplitude in birds. *PLoS ONE*. 2011. Vol. 6, no. 6. Art. e20474. DOI: 10.1371/journal.pone.0020474.
14. Patricelli G. L., Blickley J. L. Avian communication in urban noise: causes and consequences of vocal adjustment. *The Auk*. 2006. Vol. 123, no. 3. P. 639–649. DOI: 10.1093/auk/123.3.639. .
15. Slabbekoorn H., Ripmeester E. A. Birdsong and anthropogenic noise: implications and applications. *Animal Behaviour*. 2008. Vol. 75, no. 5. P. 1153–1165. DOI: 10.1016/j.anbehav.2007.09.003.
16. Fuller R. A., Warren P. H., Gaston K. J. Daytime noise predicts nocturnal singing in urban robins. *Biology Letters*. 2007. Vol. 3, no. 4. P. 368–370. DOI: 10.1098/rsbl.2007.0134.
17. Swaddle J. P., Francis C. D., Barber J. R. [et al.]. A framework to assess evolutionary responses to anthropogenic light and sound. *Trends in Ecology & Evolution*. 2015. Vol. 30, no. 9. P. 550–560. DOI: 10.1016/j.tree.2015.06.009.

18. Dominoni D. M., Quetting M., Partecke J. Urban-like night illumination reduces melatonin release and lengthens daily activity in a European blackbird. *Global Change Biology*. 2013. Vol. 19, no. 10. P. 2969–2979. DOI: 10.1111/gcb.12316.
19. Kight C. R., Swaddle J. P. How and why environmental noise impacts animals: an integrative, mechanistic review. *Ecology Letters*. 2011. Vol. 14, no. 10. P. 1052–1061. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2011.01664.x.
20. Rolland R. M., Parks S. E., Hunt K. E. [et al.]. Evidence that ship noise increases stress in right whales. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2012. Vol. 279, no. 1737. P. 2363–2368. DOI: 10.1098/rspb.2011.2429.
21. Kleist N. J., Guralnick R. P., Cruz A. [et al.]. Chronic anthropogenic noise disrupts glucocorticoid signaling and has negative fitness consequences for a free-living bird. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2018. Vol. 115, no. 4. P. E425–E434. DOI: 10.1073/pnas.1709200115.
22. Meillère A., Brischoux F., Parenteau C., Angelier F. Traffic noise exposure specifically increases telomere loss in a nestling bird. *Biology Letters*. 2015. Vol. 11, no. 9. Art. 20150559. DOI: 10.1098/rsbl.2015.0559.
23. Dorado-Correa A. M., Zollinger S. A., Heidinger B., Brumm H. Anthropogenic noise, but not artificial light levels, predicts chromosomal damage in young great tits. *Frontiers in Zoology*. 2018. Vol. 15, no. 1. Art. 22. DOI: 10.1186/s12983-018-0266-2.
24. Schroeder J., Nakagawa S., Cleasby I. R., Burke T. Passerine birds breeding under chronic noise experience reduced fitness. *PLoS ONE*. 2012. Vol. 7, no. 7. Art. e39200. DOI: 10.1371/journal.pone.0039200.
25. Francis C. D., Ortega C. P., Cruz A. Noise pollution changes avian communities and species interactions. *Current Biology*. 2009. Vol. 19, no. 16. P. 1415–1419. DOI: 10.1016/j.cub.2009.06.052.
26. Ware H. E., McClure C. J. W., Carlisle J. D., Barber J. R. A phantom road experiment reveals traffic noise is an invisible source of habitat degradation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2015. Vol. 112, no. 39. P. 12105–12109. DOI: 10.1073/pnas.1504710112.

27. Chan A. A. Y.-H., Giraldo-Perez P., Smith S., Blumstein D. T. Anthropogenic noise affects risk assessment and attention: the distracted prey hypothesis. *Biology Letters*. 2010. Vol. 6, no. 4. P. 458–461. DOI: 10.1098/rsbl.2010.0003.
28. Sueur J., Farina A., Gasc A., Pieretti N., Pavoine S. Acoustic indices for biodiversity assessment and landscape investigation. *Acta Acustica united with Acustica*. 2014. Vol. 100, no. 4. P. 772–781. DOI: 10.3813/AAA.918757.
29. Sueur J., Pavoine S., Hamerlynck O., Duvail S. Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal. *PLoS ONE*. 2008. Vol. 3, no. 12. Art. e4065. DOI: 10.1371/journal.pone.0004065.
30. Pieretti N., Farina A., Morri D. A new methodology to infer the singing activity of an avian community: The Acoustic Complexity Index (ACI). *Ecological Indicators*. 2011. Vol. 11, no. 3. P. 868–873. DOI: 10.1016/j.ecolind.2010.11.005.
31. Villanueva-Rivera L. J., Pijanowski B. C., Doucette J., Pekin B. A primer of acoustic analysis for landscape ecologists. *Landscape Ecology*. 2011. Vol. 26, no. 9. P. 1233–1246. DOI: 10.1007/s10980-011-9636-9.