

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТУСА

МОЖАРОВСЬКИЙ ОЛЕКСАНДР СЕРГІЙОВИЧ

Допускається до захисту:

завідувач кафедри біофізики і
фізіології

кандидат хім. наук, доцент

_____ О. І. Доценко

«_____» _____ 2026 р.

**ДОВГОСТРОКОВИЙ АНАЛІЗ ДИНАМІКИ БІОРІЗНОМАНІТТЯ
ПТАХІВ У ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ З ЕКОЛОГІЧНИМИ ФАКТОРАМИ НА
ОСНОВІ ДАНИХ ДОСЛІДЖЕННЯ ГНІЗДОВИХ ПТАХІВ**

Спеціальність 101 Екологія

Кваліфікаційна (бакалаврська) робота

Науковий керівник:

А.М. Міщенко

канд. біол. наук,

ст. викладач кафедри біофізики і фізіології

Оцінка: _____ / _____ /

Голова ЕК: _____

Вінниця - 2026

АНОТАЦІЯ

Можаровський О. С. Довгостроковий аналіз динаміки біорізноманіття птахів у взаємозв'язку з екологічними факторами на основі даних дослідження гніздових птахів. Спеціальність 101 «Екологія», Донецький національний університет імені Василя Стуса, Вінниця, 2026.

У роботі проаналізовано взаємозв'язок між відносною чисельністю гніздових птахів Північної Америки та станом рослинного покриву за даними Північноамериканського обліку гніздових птахів (BBS) і супутникових індексів рослинності Landsat Collection 2. Використано стандартизований набір даних BioTIME Dataset 195 (1978–2007 рр., 440 маршрутів). Здійснено просторове зіставлення точкових координат BioTIME з реальними траєкторіями маршрутів BBS та розраховано середні значення основних вегетаційних індексів (NDVI, EVI, SAVI, MSAVI, NDWI, LAI) у 800-метрових буферних коридорах уздовж маршрутів.

Встановлено статистично значуще зменшення загальної чисельності птахів (N) на тлі зростання видового багатства (S) та індексів різноманітності (H, J, 1-D). Виявлено процес біотичної гомогенізації орнітофауни: зниження домінування раніше численних видів (*Passer domesticus*, *Agelaius phoeniceus*, *Colinus virginianus* та ін.) та вирівнювання структури угруповань. Зафіксовано позитивні тренди температури та більшості індексів продуктивності рослинності, а також численні кореляційні зв'язки між динамікою чисельності птахів, кліматичними параметрами та станом рослинного покриву. Найсильніші зв'язки спостерігаються з мінімальними температурами та індексами вологості рослинності (NDWI).

Ключові слова: Північноамериканський облік гніздових птахів, BioTIME, дистанційне зондування, NDVI, NDWI, біорізноманіття, біотична гомогенізація, Північна Америка.

ABSTRACT

O. S. Mozharovskyi. Long-term analysis of avian biodiversity patterns in relation to environmental drivers using Breeding Bird Survey data. Specialty 101 «Ecology», Vasyl Stus Donetsk National University, Vinnytsia, 2026

The thesis examines the relationship between the relative abundance of breeding birds in North America and the state of vegetation cover based on the North American Breeding Bird Survey (BBS) data and Landsat Collection 2 vegetation indices. The standardized BioTIME Dataset 195 (1978–2007, 440 routes) was used. Spatial matching of BioTIME point coordinates with actual BBS route trajectories was performed, and mean values of main vegetation indices (NDVI, EVI, SAVI, MSAVI, NDWI, LAI) were calculated within 800-meter buffer corridors along the routes.

A statistically significant decline in total bird abundance (N) was revealed against the background of an increase in species richness (S) and diversity indices (H, J, 1-D). The process of biotic homogenization of the avifauna was identified: a decrease in the dominance of previously abundant species (*Passer domesticus*, *Agelaius phoeniceus*, *Colinus virginianus*, etc.) and the equalization of community structure. Positive trends in temperature and most vegetation productivity indices were recorded, along with numerous correlations between bird population dynamics, climatic parameters, and vegetation condition. The strongest relationships were found with minimum temperatures and vegetation moisture indices (NDWI).

Key words: North American Breeding Bird Survey, BioTIME, remote sensing, NDVI, NDWI, biodiversity, biotic homogenization, North America.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	9
1.1. Північноамериканський облік гніздових птахів (BBS) як основне джерело даних моніторингу орнітофауни	9
1.2. Просторовий дизайн та протокол проведення обліків	9
1.3. Основні обмеження даних BBS	10
1.4. Набір даних BioTIME Dataset 195	11
1.5. Рослинність як ключовий фактор формування орнітокомплексів	11
1.6. Дистанційне зондування в дослідженнях взаємозв'язків «птахи – середовище».....	12
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	13
2.1. Характеристика даних Північноамериканського обліку гніздових птахів (BBS).....	13
2.2. Обмеження даних BBS	14
2.3. Набір даних BioTIME Dataset 195	15
2.4. Методика просторового зіставлення маршрутів.....	15
2.5. Методи дистанційного зондування рослинності	16
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ.....	17
3.1. Часові тренди показників біорізноманіття, кліматичних параметрів та індексів вегетації на гама-рівні Північної Америки та їх кореляційні зв'язки	17
3.1.1. Кореляційний аналіз між показниками біорізноманіття	21
3.1.2. Кореляційний аналіз індексів вегетації.....	23
3.1.3. Кореляційні зв'язки між показниками біорізноманіття та кліматичними чинниками.....	23
3.2. Пояснення спостережуваної динаміки показників біорізноманіття.	27
3.2.1. Динаміка рясності окремих видів та процеси гомогенізації угруповання	27
3.2.2. Тренди рясності окремих видів за результатами лінійної регресії	28
3.2.3 Кореляційний аналіз часових рядів рясності видів птахів Північної Америки.....	31

3.2.4 Кореляційний аналіз між рясністю видів птахів та кліматичними показниками	38
3.2.5 Кореляційний аналіз між рясністю видів птахів та індексами вегетації	43
3.3. Видоспецифічні середньозважені (за рясністю) значення кліматичних умов та показників вегетації	48
ВИСНОВКИ.....	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	59

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасні зміни клімату, інтенсифікація сільського господарства та урбанізація призводять до швидкої трансформації природних екосистем, що безпосередньо впливає на стан популяцій птахів. Птахи є одним із найчутливіших індикаторів змін біорізноманіття, тому моніторинг їхньої чисельності та видового складу має велике наукове і природоохоронне значення.

Одним із найбільш масштабних і тривалих джерел даних про популяції гніздових птахів Північної Америки є Північноамериканський облік гніздових птахів (North American Breeding Bird Survey, BBS), який функціонує з 1966 року. Дані цієї програми широко використовуються для вивчення довгострокових тенденцій чисельності птахів. Однак для розуміння причин цих змін недостатньо лише орнітологічних даних. Ключовим фактором, що визначає розподіл і чисельність птахів, є стан рослинного покриву — його структура, продуктивність і сезонна динаміка.

Актуальність дослідження полягає в необхідності інтеграції даних багаторічного моніторингу птахів (BBS) з матеріалами дистанційного зондування Землі. Використання набору даних BioTIME Dataset 195 у поєднанні з індексами рослинності Landsat дозволяє оцінити вплив стану рослинності на орнітофауну на регіональному рівні. Таке поєднання методів є перспективним напрямком сучасної екології та біогеографії.

Мета роботи - встановити закономірності довгострокової динаміки біорізноманіття гніздових птахів Північної Америки та оцінити її взаємозв'язок із кліматичними факторами й характеристиками рослинного покриву на основі інтегрованого аналізу даних моніторингу птахів, кліматичних спостережень і дистанційного зондування Землі. .

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі *завдання*:

1. Здійснити інтеграцію даних моніторингу гніздових птахів, кліматичних даних та супутникових характеристик рослинного покриву в єдину просторово узгоджену базу даних для подальшого аналізу.
2. Оцінити довгострокову динаміку показників гамма-різноманіття гніздових птахів Північної Америки у 1978–2007 роках.
3. Дослідити часові зміни кліматичних параметрів та характеристик рослинного покриву на території дослідження.
4. Визначити взаємозв'язки між показниками біорізноманіття, кліматичними факторами та індексами рослинності на гамма-рівні.

5. Проаналізувати довгострокові тренди чисельності окремих видів птахів та оцінити їх внесок у зміни структури орнітологічних угруповань.

6. Виявити види, найбільш чутливі до змін кліматичних умов і рослинного покриву, та оцінити роль екологічних факторів у формуванні спостережуваних трендів біорізноманіття.

7. Оцінити зв'язок між динамікою чисельності видів та їх екологічними оптимумами за кліматичними й вегетаційними характеристиками середовища.

Предмет дослідження - Часові зміни показників гамма-різноманіття гніздових птахів, динаміка чисельності окремих видів та їх взаємозв'язок із кліматичними характеристиками й показниками рослинного покриву, отриманими за даними дистанційного зондування Землі.

Об'єкт дослідження - угруповання гніздових птахів Північної Америки та їх багаторічна динаміка в умовах змін клімату і рослинного покриву.

Методи дослідження. У роботі використано:

- методи геоінформаційного аналізу та просторової обробки даних;
- методи дистанційного зондування Землі;
- методи інтеграції різнорідних екологічних даних;
- розрахунок показників біорізноманіття (видове багатство, індекси Шеннона, Сімпсона, Піелу тощо);
- аналіз часових рядів;
- кореляційний аналіз Спірмена;
- лінійну регресію для оцінки часових трендів;
- статистичні методи аналізу екологічних даних;
- методи обробки даних у середовищах Python, GeoPandas та Google Earth Engine.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

1. Вперше для території Північної Америки проведено комплексний інтегрований аналіз довгострокової динаміки **гамма-різноманіття** гніздових птахів за період 1978–2007 років на основі даних North American Breeding Bird Survey (BBS) та BioTIME Dataset 195 у поєднанні з даними дистанційного зондування Землі (Landsat);

2. Розроблено та апробовано методологію просторово-часової інтеграції різнорідних даних (орнітологічних, кліматичних та супутникових) в єдину геоінформаційну базу, що дозволило виконати багатофакторний аналіз впливу змін рослинного покриву та клімату на орнітофауну на регіональному рівні;

3. Встановлено кількісні взаємозв'язки між показниками гамма-різноманіття птахів, кліматичними параметрами та характеристиками рослинного покриву (індекси NDVI, EVI та фенологічні показники), визначено роль рослинності як посередника впливу кліматичних змін на угруповання птахів;

4. Виявлено види птахів, найбільш чутливі до змін кліматичних умов і стану рослинного покриву, та оцінено їх екологічні оптимуми за градієнтами ключових екологічних факторів;

5. Уточнено внесок окремих видів у формування загальних трендів біорізноманіття та структуру орнітологічних угруповань Північної Америки за останні три десятиліття.

Практичне значення роботи полягає в тому, що:

1. Розроблені методичні підходи та алгоритми інтеграції даних моніторингу птахів з матеріалами дистанційного зондування можуть бути використані для вдосконалення систем моніторингу біорізноманіття на національному та регіональному рівнях;

2. Отримані результати дозволяють виявляти території з найвищою вразливістю орнітофауни до змін клімату та трансформації рослинного покриву, що важливо для обґрунтування природоохоронних пріоритетів;

3. Визначені види-індикатори чутливості до змін середовища можуть застосовуватися для оперативної оцінки стану екосистем;

4. Матеріали роботи можуть бути використані при розробці стратегій збереження біорізноманіття, плануванні заходів з відновлення екосистем, а також у рамках міжнародних програм моніторингу (Partners in Flight, IPBES, CBD);

5. Створений інструментарій придатний для адаптації в умовах України та інших країн для оцінки впливу глобальних змін на популяції птахів.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Північноамериканський облік гніздових птахів (BBS) як основне джерело даних моніторингу орнітофауни

Північноамериканський облік гніздових птахів (North American Breeding Bird Survey, BBS) є однією з найбільших і найтриваліших програм моніторингу популяцій птахів у світі. Програму було започатковано в 1966 році (після пілотних випробувань у 1965 році) спільними зусиллями Геологічної служби США (USGS) та Служби дикої природи Канади [Pardieck et al., 2015; Ziolkowski et al., 2025].

На момент запуску було проведено близько 600 обліків на сході континенту. Поступово програма розширювалася на захід і північ, охопивши до кінця 1980-х років практично всю територію суміжних штатів США, південь Канади, а також Аляску, Юкон і Північно-Західні території. На сьогодні в програмі зареєстровано близько 3700 активних маршрутів, з яких щорічно обстежується приблизно 2900–3000 [Ziolkowski et al., 2025].

Основною метою BBS є відстеження довгострокових змін відносної чисельності гніздових видів птахів Північної Америки. Обліки проводяться щорічно протягом періоду розмноження (переважно в червні, у деяких південних регіонах — у травні) висококваліфікованими волонтерами-орнітологами, які володіють навичками ідентифікації птахів за голосом і зовнішнім виглядом. Кожен маршрут складається з 50 стандартизованих зупинок, що забезпечує високу порівнянність даних у часі та просторі.

Завдяки понад 55-річному періоду безперервних спостережень і значному просторовому охопленню дані BBS стали фундаментальним джерелом інформації для вивчення тенденцій популяцій птахів, оцінки впливу антропогенних факторів, змін клімату та розробки природоохоронних стратегій на континентальному рівні. Дані програми використовуються для аналізу статусу понад 500 видів птахів і є ключовим компонентом багатьох міжнародних доповідей про стан біорізноманіття [Ziolkowski et al., 2025].

1.2. Просторовий дизайн та протокол проведення обліків

Моніторинг у рамках Північноамериканського обліку гніздових птахів здійснюється вздовж фіксованих лінійних маршрутів довжиною приблизно 39,2 км. Кожен маршрут складається з 50 стандартизованих зупинок, розташованих на відстані близько 800 м одна від одної. На кожній зупинці спостерігач проводить 3-хвилинний стаціонарний облік (point count), під час якого реєструє всіх птахів, видимих у радіусі 400 м, а також усіх птахів, яких чути на будь-якій відстані [Pardieck et al., 2015; Ziolkowski et al., 2025].

Обліки починаються за 30 хвилин до сходу сонця і проводяться за сприятливих погодних умов. Кожен маршрут обстежується один раз на рік, бажано тим самим спостерігачем, що забезпечує максимальну порівнянність даних у багаторічній перспективі.

Така стандартизована методика дозволяє отримувати індекс відносної чисельності видів, який є основою для аналізу довгострокових тенденцій популяцій птахів на континентальному рівні. Незважаючи на те, що BBS не дає абсолютної чисельності, отримані індекси добре відображають загальні зміни в популяціях і широко застосовуються в наукових дослідженнях та природоохоронному плануванні.

1.3. Основні обмеження даних BBS

Незважаючи на високу наукову цінність і унікальну тривалість, дані Північноамериканського обліку гніздових птахів мають ряд суттєвих методологічних обмежень, які необхідно враховувати при аналізі та інтерпретації результатів.

Найважливішими з них є:

- придорожній ефект (roadside bias) — маршрути прокладені вздовж автомобільних доріг, через що значно краще обліковуються види, пов'язані з крайовими та відкритими біотопами, і суттєво недообліковуються види, що мешкають у внутрішніх частинах лісів, боліт та інших віддалених від доріг територіях;
- нерівномірна щільність маршрутів по території континенту, яка зумовлена доступністю кваліфікованих волонтерів, а не статистично репрезентативним планом вибірки;
- значна невизначеність точного географічного розташування окремих зупинок, особливо в історичних даних (до широкого використання GPS);
- обмежена доступність даних на рівні окремих зупинок — повні stop-level дані доступні лише з 1997 року, тоді як за попередні роки існують лише агреговані 10-зупинкові підсумки;
- вплив змінності спостерігачів (observer variability) та мінливості погодних умов на результати обліків.

Зазначені обмеження можуть суттєво впливати на точність просторового аналізу та оцінку реальних тенденцій популяцій, особливо для лісо- та болотозалежних видів. У сучасних дослідженнях ці проблеми намагаються частково компенсувати за допомогою статистичних моделей і використання додаткових даних дистанційного зондування [Burner et al., 2024].

1.4. Набір даних BioTIME Dataset 195

Для сучасних досліджень значний інтерес становить набір даних 195 глобальної бази BioTIME під назвою «Breeding Birds Survey North America». Цей набір даних містить 699 142 записи щодо 383 видів птахів за період 1978–2007 років і базується на офіційних даних Північноамериканського обліку гніздових птахів (версія 2014.0) [Dornelas et al., 2018].

У процесі інтеграції в базу BioTIME оригінальні дані BBS були суттєво стандартизовані та трансформовані відповідно до єдиної структури бази. Основні зміни включають:

- агрегацію даних на рівні всього маршруту (сума всіх 50 зупинок) замість індивідуальних зупинок;
- таксономічну стандартизацію — зведення всіх підвидів, рас та невизначених форм до рівня виду;
- значне скорочення метаданих (зокрема, інформації про спостерігача, якість обліку та погодні умови);
- представлення кожного маршруту однією парою географічних координат (зазвичай центроїд або початкова точка маршруту).

Таке представлення даних є зручним для загального аналізу часових рядів біорізноманіття, проте створює певні труднощі для точного просторового накладання з даними дистанційного зондування, оскільки втрачається детальна інформація про внутрішньомаршрутну варіабельність [Dornelas et al., 2025].

1.5. Рослинність як ключовий фактор формування орнітокомплексів

Структура, продуктивність і сезонна динаміка рослинного покриву належать до найважливіших екологічних факторів, що визначають видовий склад, чисельність і просторовий розподіл гніздових птахів. Рослинність безпосередньо впливає на доступність кормових ресурсів, придатність місць для гніздування, рівень захисту від хижаків та мікрокліматичні умови на території.

Більш складна вертикальна структура рослинності (наявність кількох ярусів, різноманіття життєвих форм) зазвичай сприяє підвищенню видового різноманіття птахів, забезпечуючи більше екологічних ніш. Продуктивність рослинного покриву, у свою чергу, визначає загальну кількість доступної біомаси, що особливо важливо для комахоїдних і зерноїдних видів. Сезонна динаміка рослинності (фенологія) також відіграє ключову роль, оскільки синхронізація періодів гніздування птахів з піками продуктивності рослин і комах є критичною для успішного вирощування потомства.

У зв'язку з цим для глибокого розуміння просторово-часових змін у популяціях птахів необхідне кількісне оцінювання параметрів рослинного покриву на масштабах, співставних з територіями, які використовують птахи. Саме тому в сучасних дослідженнях все ширше застосовуються дані дистанційного зондування, які дозволяють отримувати об'єктивні та repeatable показники стану рослинності на великих територіях.

1.6. Дистанційне зондування в дослідженнях взаємозв'язків «птахи – середовище»

Сучасні методи дистанційного зондування надають унікальну можливість отримувати об'єктивні, однорідні в просторі та часі показники стану рослинного покриву на великих територіях. Серед найбільш поширених і добре апробованих показників є вегетаційні індекси, розраховані за даними супутникових систем Landsat та Sentinel-2, зокрема:

- NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) — основний індекс зеленої маси та загальної продуктивності рослинності;
- EVI, SAVI, MSAVI — індекси, менш чутливі до впливу ґрунту та атмосферних ефектів;
- NDWI — індекс вмісту води в рослинності;
- LAI — індекс площі листкової поверхні.

Ці індекси дозволяють кількісно оцінювати продуктивність, структуру та фенологічний стан рослинності, які є ключовими драйверами розподілу та чисельності птахів.

Для коректного аналізу даних Північноамериканського обліку гніздових птахів особливо важливим є витягнення значень індексів не з окремої точки (центроїда маршруту), а вздовж усієї траєкторії маршруту в буферній зоні. Оптимальною вважається буферна зона шириною 800 м (по 400 м з обох боків лінії маршруту), що відповідає номінальному радіусу виявлення птахів під час обліків. Такий підхід значно підвищує екологічну релевантність аналізу та дозволяє точніше співставляти умови середовища з даними про чисельність птахів.

Таким чином, аналіз літературних джерел свідчить про високу актуальність і перспективність інтеграції даних довгострокового орнітологічного моніторингу (BBS) з матеріалами дистанційного зондування. Подібний комплексний підхід дає змогу глибше зрозуміти механізми формування та динаміки орнітокомплексів під впливом змін рослинного покриву та інших факторів середовища.

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Характеристика даних Північноамериканського обліку гніздових птахів (BBS)

Північноамериканський облік гніздових птахів (North American Breeding Bird Survey, BBS) є однією з найбільших і найтриваліших програм моніторингу популяцій птахів у світі. Програму було започатковано в 1966 році після пілотних випробувань у 1965 році спільними зусиллями Геологічної служби США (USGS) та Служби дикої природи Канади. На момент запуску було проведено близько 600 обліків переважно на сході континенту. Поступово програма розширювалася на захід і північ, охопивши до кінця 1960-х років більшу частину суміжних штатів США та півдня Канади, а в подальшому — Аляску, Юкон та Північно-Західні території [Pardieck et al., 2015; Ziolkowski et al., 2025].

Станом на 2025 рік у програмі зареєстровано понад 5300 маршрутів, з яких щорічно обстежується близько 3000. Дані BBS охоплюють понад 700 таксонів птахів і є основним джерелом інформації про довгострокові тенденції популяцій більш ніж 500 видів птахів Північної Америки [Ziolkowski et al., 2025].

Метою програми є відстеження довгострокових змін відносної чисельності видів птахів, які гніздяться на території Північної Америки. Обліки проводять щорічно в період максимальної гніздової активності птахів — переважно протягом червня, а в пустельних регіонах та деяких південних штатах — у травні.

Моніторинг здійснюється мережею кваліфікованих волонтерів-орнітологів, які володіють високим рівнем навичок визначення птахів за голосом і зовнішнім виглядом. Кожен маршрут BBS являє собою фіксований лінійний трансект довжиною приблизно 39,2 км і включає точно 50 зупинок, розташованих через інтервали близько 800 м. На кожній зупинці спостерігач проводить 3-хвилинний стаціонарний облік, реєструючи всіх птахів, видимих у радіусі 400 м, та всіх птахів, яких чути на будь-якій відстані. Обліки починаються за 30 хвилин до місцевого сходу сонця і тривають загалом 4–5 годин. Кожен маршрут обстежується один раз на рік, переважно тим самим спостерігачем у послідовні роки, що забезпечує високу порівнянність даних у часі.

Дані BBS створюють індекс відносної чисельності видів і широко використовуються для аналізу тенденцій популяцій, оцінки впливу антропогенних факторів, змін клімату та розробки природоохоронних стратегій.

2.2. Обмеження даних BBS

Незважаючи на значний науковий потенціал і унікальну тривалість, дані Північноамериканського обліку гніздових птахів мають низку суттєвих методологічних обмежень, які необхідно враховувати при аналізі та інтерпретації результатів.

Основними обмеженнями є:

- Придорожній ефект (roadside bias) — маршрути прокладені виключно вздовж автомобільних доріг, що призводить до систематичного переважання в обліках видів, пов'язаних з крайовими та відкритими біотопами, та недообліку видів, які населяють внутрішні частини лісів, боліт та інших віддалених від доріг територій;
- Нерівномірність просторового розміщення маршрутів — щільність маршрутів значною мірою залежить від регіональної доступності кваліфікованих волонтерів-орнітологів, а не від статистично репрезентативного або стратифікованого плану вибірки. Найвища концентрація маршрутів спостерігається в густонаселених регіонах сходу США, тоді як у віддалених північних і західних районах вона суттєво нижча;
- Невизначеність географічного положення зупинок — особливо в історичних даних (до широкого впровадження GPS-технологій) точні координати окремих зупинок часто відсутні або визначаються з низькою точністю;
- Обмежена доступність даних на рівні окремих зупинок — повні дані по кожній з 50 зупинок доступні лише з 1997 року. За період 1966–1996 років більшість даних представлено лише у вигляді агрегованих 10-зупинкових підсумків, що суттєво знижує просторову роздільну здатність аналізу;
- Змінність спостерігачів (observer variability) та вплив погодних умов — оскільки облік проводять різні волонтери, а також через щорічну мінливість погодних умов, у часові ряди вноситься додатковий шум, який може частково маскувати реальні зміни чисельності популяцій.

Зазначені обмеження можуть суттєво впливати на результати просторово-часового аналізу, особливо при вивченні видів, чутливих до структури середовища. У даному дослідженні ці особливості даних були враховані при виборі методів обробки та інтерпретації отриманих результатів [Burner et al., 2024].

2.3. Набір даних BioTIME Dataset 195

Для проведення дослідження було використано набір даних 195 з глобальної відкритої бази BioTIME під назвою «Breeding Birds Survey North America». Даний набір містить 699 142 записи щодо 383 видів птахів за період 1978–2007 років. Джерелом первинних даних є офіційний архів Північноамериканського обліку гніздових птахів версії 2014.0 (USGS Patuxent Wildlife Research Center) [Dornelas et al., 2018; Pardieck et al., 2015].

При інтеграції в базу BioTIME оригінальні дані BBS пройшли суттєву стандартизацію та трансформацію відповідно до єдиної структури бази. Основні зміни включають:

- Просторова агрегація — дані представлені на рівні всього маршруту (сума всіх 50 зупинок), а не на рівні окремих зупинок;
- Таксономічна стандартизація — усі підвиди, раси та неідентифіковані таксономічні групи агреговані до рівня виду;
- Скорочення метаданих — з основної таблиці даних вилучено більшість додаткової інформації, зокрема ідентифікатори спостерігачів, показники якості обліків та дані про погодні умови;
- Збережено ключові поля — вид, кількість особин, рік спостереження та географічні координати маршруту.

Важливою особливістю Dataset 195 є те, що кожен маршрут представлений лише однією парою координат (широта і довгота), яка відповідає, як правило, центроїду маршруту або його початковій точці. Такий формат значно спрощує загальний аналіз часових рядів, але створює певні труднощі для високоточних просторових досліджень, оскільки втрачається інформація про варіабельність всередині маршруту.

2.4. Методика просторового зіставлення маршрутів

Оскільки в наборі даних BioTIME Dataset 195 кожен маршрут представлений лише однією географічною точкою (центроїд або початкова точка), для точного витягнення даних дистанційного зондування вздовж усього маршруту було виконано просторове зіставлення цих точок з реальними траєкторіями маршрутів BBS.

Для зіставлення використано векторний шар «Breeding Bird Survey Route Locations for Lower 48 States», доступний на платформі Data Basin (Conservation Biology Institute). Зіставлення проводилося геометричним методом найближчої лінії (nearest-line matching) у програмному середовищі Python з використанням бібліотеки GeoPandas.

Методика полягала у проєкції точок BioTIME та ліній маршрутів у єдину метричну систему координат (NAD83 / Conus Albers Equal Area), після чого для кожної точки BioTIME визначалася найближча лінія маршруту з розрахунком перпендикулярної відстані. У разі рівних відстаней (рідкісні випадки) застосовувався детермінований критерій вибору.

У результаті успішно зіставлено 419 з 440 маршрутів (95,2 %). Медіанна відстань від точки BioTIME до відповідної лінії маршруту становила менше 1 км, що свідчить про високу точність зіставлення. Маршрути, розташовані за межами нижніх 48 штатів (Канада, Аляска), не були зіставлені через відсутність векторних даних у використаному shapefile.

Отриманий шар зіставлених траєкторій маршрутів став основою для подальшого витягнення даних дистанційного зондування рослинності вздовж 800-метрових буферних коридорів.

2.5. Методи дистанційного зондування рослинності

Для оцінки стану рослинності вздовж маршрутів BBS були обрані шість основних вегетаційних індексів: NDVI, EVI, SAVI, MSAVI, NDWI та LAI. Основним індексом для подальшого аналізу обрано NDVI завдяки його тривалій історії та добрій інтерпретовності.

Дані дистанційного зондування отримані з архіву Landsat Collection 2 (1984–2007 рр.). Для кожного маршруту створювали буферну зону шириною 800 м (по 400 м з кожної сторони лінії маршруту), що відповідає радіусу обліку птахів. Значення індексів розраховували як середнє по всіх пікселях у межах буфера за період травень–серпень кожного року з використанням піксельної медіани.

Обробку даних дистанційного зондування виконували в Google Earth Engine.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

3.1. Часові тренди показників біорізноманіття, кліматичних параметрів та індексів вегетації на гама-рівні Північної Америки та їх кореляційні зв'язки

У даному підрозділі представлено аналіз динаміки показників біорізноманіття птахів на гама-рівні (регіональному) для всієї Північної Америки. Дані моніторингу взяті з набору BIOTime (попередньо оброблені дані North American Breeding Bird Survey — BBS) і охоплюють період 1978–2007 рр. по 440 локаціях. Для кожного року всі локації розглядалися як єдине ціле, що дозволило оцінити загальнорегіональні тренди.

Для характеристики біорізноманіття використовувалися такі показники: видове багатство (S), загальна чисельність (N), індекс Шеннона (H), індекс Сімпсона (D), індекс рівномірності Піелу (J), обернений індекс Сімпсона (1/D) та індекс різноманітності Сімпсона (1-D).

Кліматичні умови характеризувалися показниками з бази CRU TS v4.09: середньорічна температура (T), сезонні температури, середні мінімальні (Tmin) та максимальні (Tmax) температури повітря, кількість опадів та кількість вологих днів.

Індекси вегетації були розраховані на основі супутникових даних за період 1984–2007 рр. у буферній зоні 400 м навколо кожного маршруту моніторингу: NDVI, NDWI, EVI, SAVI, MSAVI та LAI.

Використані показники наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Показники, використані для аналізу часових рядів на гама-рівні Північної Америки

Група показників	Позначення	Повна назва / опис
Біорізноманіття	S	Видове багатство (Richness)
Біорізноманіття	N	Загальна чисельність (Total abundance)
Біорізноманіття	H	Індекс Шеннона
Біорізноманіття	D	Індекс Сімпсона
Біорізноманіття	J	Індекс рівномірності Піелу
Біорізноманіття	1/D	Обернений індекс Сімпсона

Група показників	Позначення	Повна назва / опис
Біорізноманіття	1-D	Індекс різноманітності Сімпсона
Кліматичні (CRU)	T, T_3_6, T_5_8	Середня температура (річна та сезонна)
Кліматичні (CRU)	Tmin, Tmin_3_6, Tmin_5_8	Середні мінімальні температури
Кліматичні (CRU)	Tmax, Tmax_3_6, Tmax_5_8	Середні максимальні температури
Кліматичні (CRU)	pre_3_6, pre_5_8	Кількість опадів (сезонна)
Кліматичні (CRU)	wet_3_6, wet_5_8	Кількість вологих днів (сезонна)
Індекси вегетації	NDVI, EVI, SAVI, MSAVI, LAI	Індекси зеленості та біомаси
Індекси вегетації	NDWI	Індекс вмісту води в рослинності

Часові ряди показників біорізноманіття птахів наведено на рисунку 3.1.

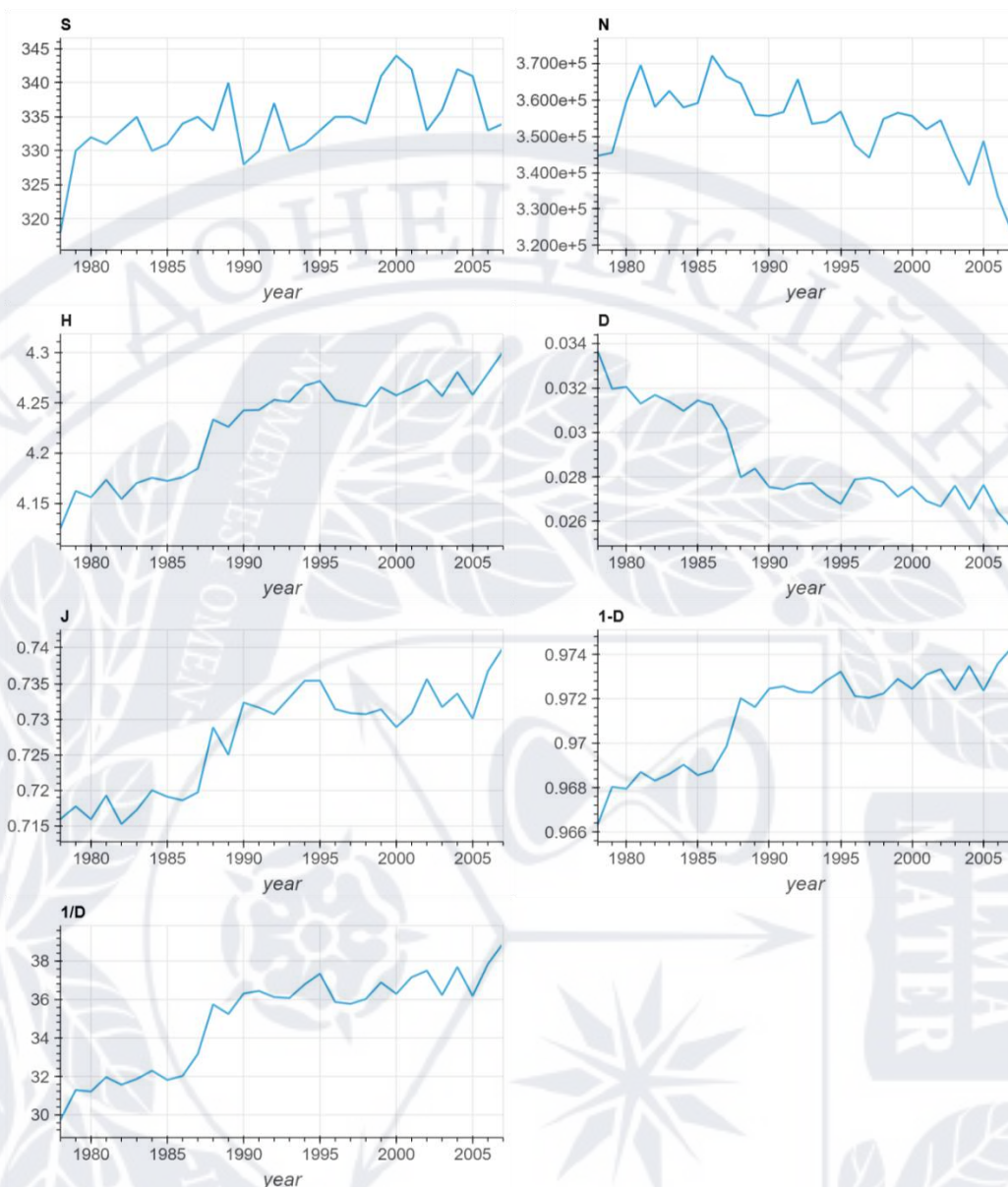


Рис. 3.1. Часові ряди показників біорізноманіття птахів на гама-рівні Північної Америки у період 1978–2007 рр.

Аналіз часових рядів (рис. 3.1) виявив чіткі тренди. Видове багатство (S) демонструє стабільне зростання протягом усього досліджуваного періоду. Водночас загальна рясність (N) виразно зменшується. Індекс домінування Сімпсона (D) має негативний тренд, тоді як індекси Шеннона (H), рівномірності Піелу (J), обернений індекс Сімпсона (1/D) та індекс різноманітності Сімпсона (1-D) характеризуються позитивною динамікою. Найбільш виразні зміни спостерігаються у загальній чисельності птахів та видовому багатстві.

Часові ряди кліматичних показників представлено на рисунку 3.2.

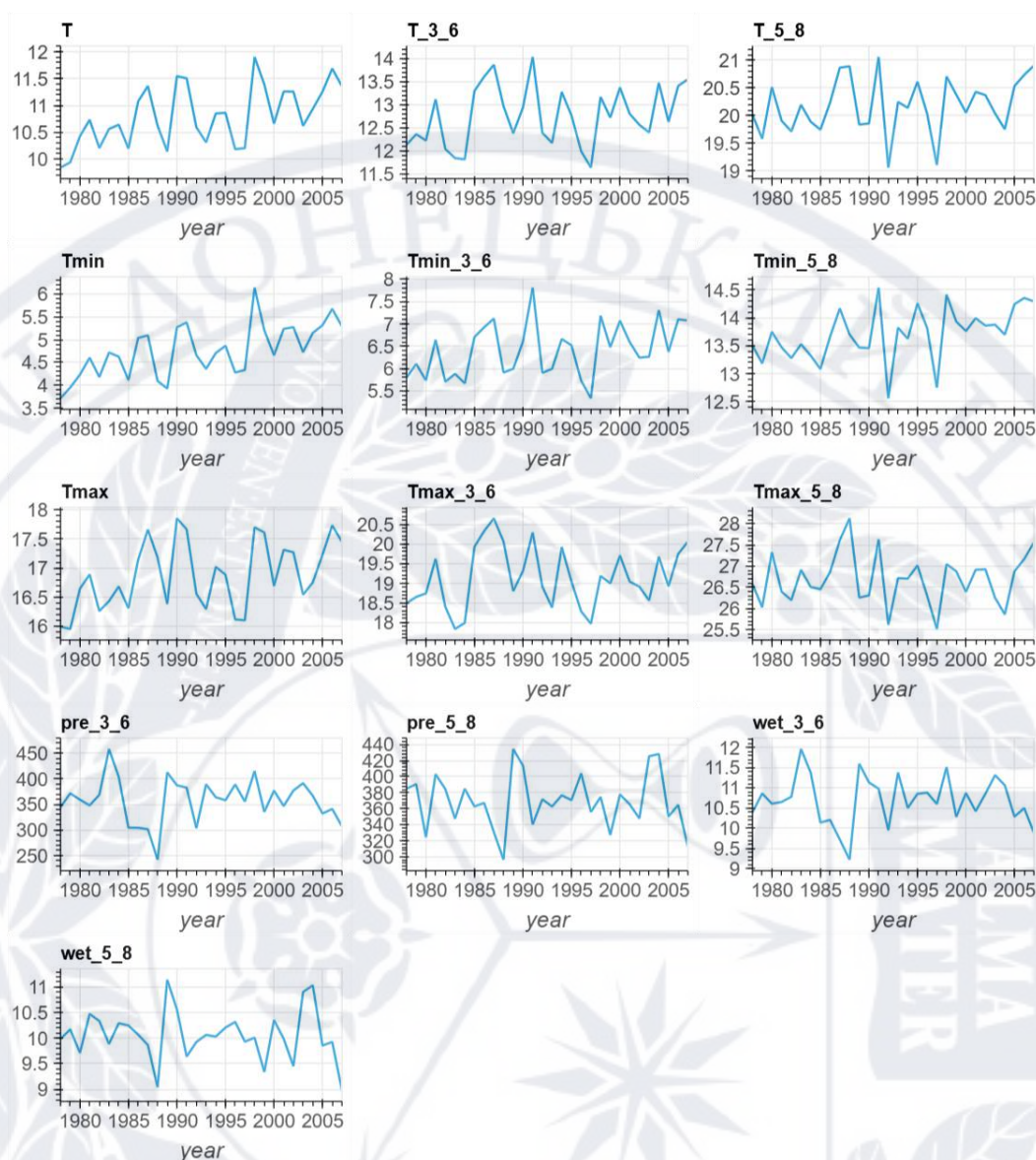


Рис. 3.2. Часові ряди кліматичних показників CRU TS v4.09 на території моніторингу в Північній Америці (1978–2007 рр.)

На рисунку 3.2 чітко простежуються позитивні тренди температурних показників. Середньорічна температура повітря (T), середні мінімальні (Tmin) та максимальні (Tmax) температури демонструють стабільне підвищення протягом досліджуваного періоду.

Динаміка індексів вегетації наведена на рисунку 3.3.

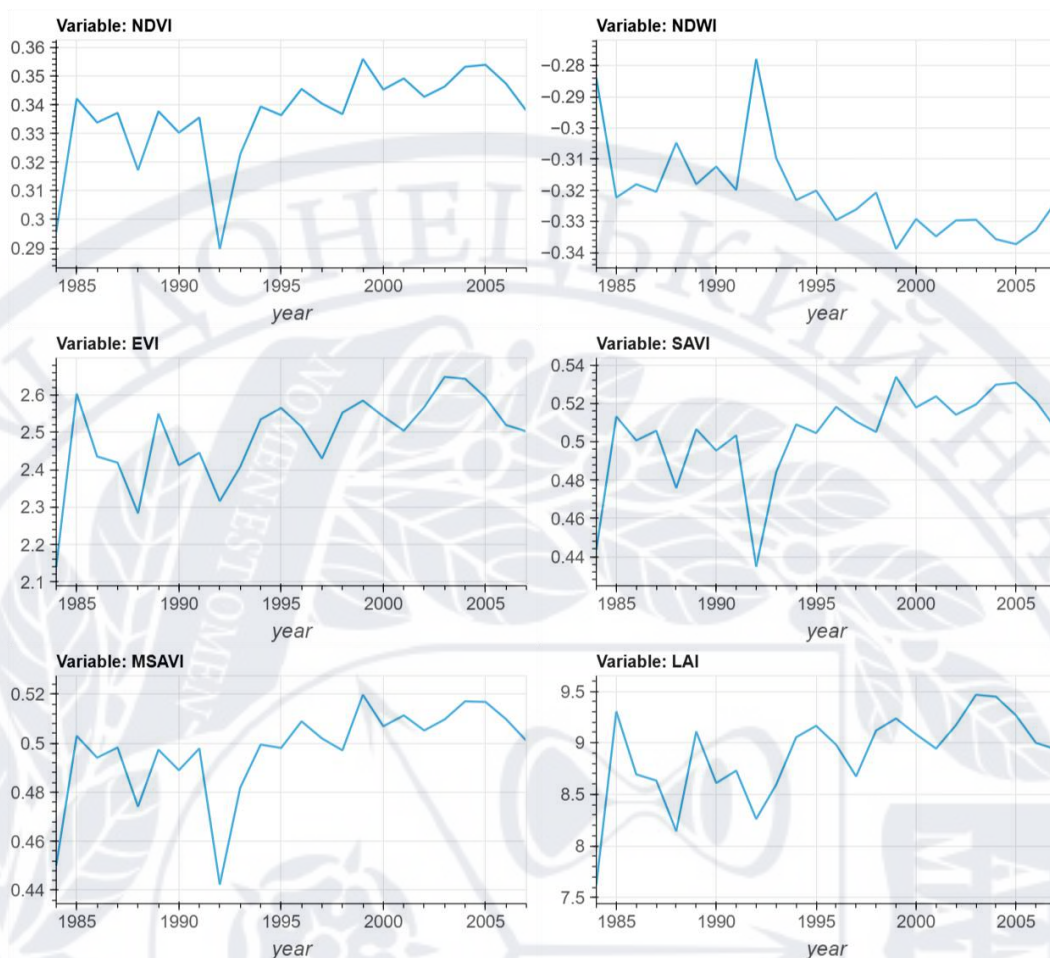


Рис. 3.3. Часові ряди індексів вегетації на території моніторингу птахів у Північній Америці (1984–2007 рр.)

Аналіз супутникових індексів вегетації показав позитивні тренди для NDVI, EVI, SAVI, MSAVI та LAI, що свідчить про збільшення продуктивності та щільності рослинного покриву. Натомість індекс NDWI демонструє негативний тренд, вказуючи на можливе зниження вологості рослинності попри зростання зеленої біомаси.

3.1.1. Кореляційний аналіз між показниками біорізноманіття

Результати кореляційного аналізу Спірмена між індексами біорізноманіття наведені в таблиці 3.2 та на рисунку 3.4 (пари з $|r| > 0,5$ та $p < 0,05$).

Таблиця 3.2. Статистично значущі коефіцієнти рангової кореляції Спірмена між індексами біорізноманіття ($|r| > 0,5$, $p < 0,05$)

X	Y	r	p-value	95% ДІ
D	1-D	-1,000	0,000	[-1,0; -1,0]

Продовження Таблиці 3.2.

D	1/D	-1,000	0,000	[-1,0; -1,0]
H	D	-0,956	$1,68 \times 10^{-16}$	[-0,98; -0,91]
D	J	-0,922	$4,56 \times 10^{-13}$	[-0,96; -0,84]
N	J	-0,542	$1,99 \times 10^{-3}$	[-0,75; -0,23]
N	H	-0,509	$4,05 \times 10^{-3}$	[-0,73; -0,18]
H	J	0,898	$1,79 \times 10^{-11}$	[0,79; 0,95]
J	1-D	0,922	$4,56 \times 10^{-13}$	[0,84; 0,96]
J	1/D	0,922	$4,56 \times 10^{-13}$	[0,84; 0,96]
H	1-D	0,956	$1,68 \times 10^{-16}$	[0,91; 0,98]
H	1/D	0,956	$1,68 \times 10^{-16}$	[0,91; 0,98]
1-D	1/D	1,000	0,000	[1,0; 1,0]

Аналіз результатів. Індекс Сімпсона D та його обернені форми (1-D, 1/D) демонструють абсолютну кореляцію, що є математично очікуваним. Індекс Шеннона (H) має дуже сильний негативний зв'язок з D ($r = -0,956$) та сильний позитивний з 1-D і 1/D. Індекс рівномірності Пієлу (J) тісно пов'язаний з H та D. Загальна чисельність (N) показує помірний негативний зв'язок з H та J.

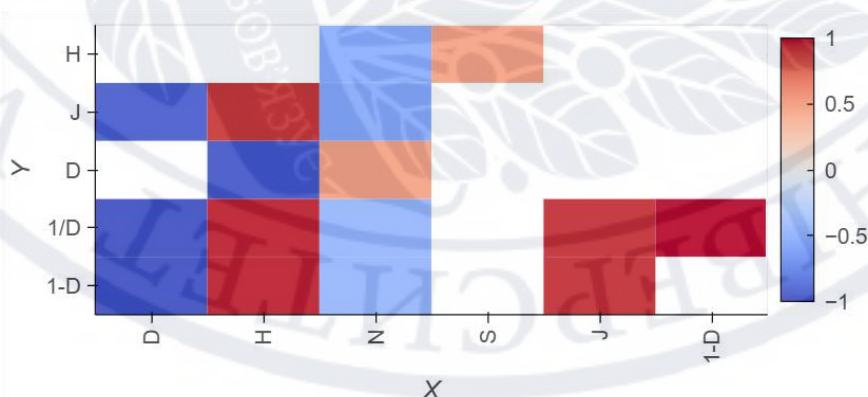


Рис. 3.4. Матриця рангових кореляцій Спірмена між індексами біорізноманіття ($p < 0,05$)

3.1.2. Кореляційний аналіз індексів вегетації

Таблиця 3.3. Статистично значущі коефіцієнти рангової кореляції Спірмена між індексами вегетації ($|r| > 0,8$, $p < 0,05$)

X	Y	r	p-value	95% ДІ
NDWI	SAVI	-0,994	0,000	[-0,99; -0,99]
NDVI	NDWI	-0,994	0,000	[-0,99; -0,99]
NDWI	MSAVI	-0,993	0,000	[-0,99; -0,99]
SAVI	MSAVI	0,999	0,000	[1,0; 1,0]
NDVI	MSAVI	0,999	0,000	[1,0; 1,0]
NDVI	SAVI	1,000	0,000	[1,0; 1,0]
EVI	LAI	1,000	0,000	[1,0; 1,0]

Аналіз результатів. NDVI, SAVI та MSAVI демонструють практично ідеальну кореляцію між собою і можуть вважатися взаємозамінними. Рекомендується залишити лише NDVI. EVI та LAI також повністю дублюють один одного. NDWI несе самостійну інформацію, маючи сильний негативний зв'язок з групою зелених індексів.

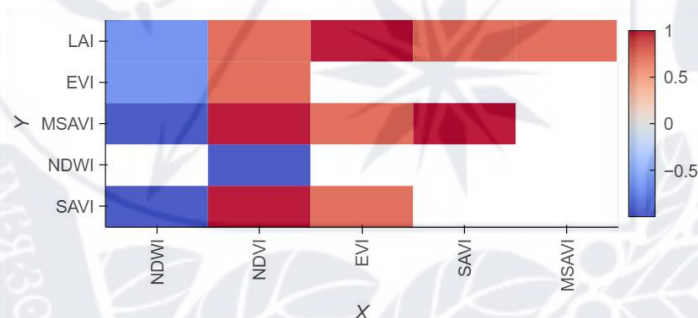


Рис. 3.5. Матриця рангових кореляцій Спірмена між індексами вегетації ($p < 0,05$)

3.1.3. Кореляційні зв'язки між показниками біорізноманіття та кліматичними чинниками

Таблиця 3.4. Кореляція Спірмена між показниками біорізноманіття та температурними показниками ($|r| > 0,6$; $p < 0,05$)

Показник біорізноманіття	Кліматичний показник	r	p-unc	95% довірчий інтервал
D	Tmin	-0,727	0,000005	[-0,86; -0,50]
D	T	-0,667	0,000057	[-0,83; -0,40]
D	Tmax	-0,604	0,000414	[-0,79; -0,31]
1-D	Tmax	0,604	0,000414	[0,31; 0,79]
1/D	Tmax	0,604	0,000414	[0,31; 0,79]
H	Tmin	0,633	0,000172	[0,35; 0,81]
1-D	T	0,667	0,000057	[0,40; 0,83]
1/D	T	0,667	0,000057	[0,40; 0,83]
1-D	Tmin	0,727	0,000005	[0,50; 0,86]
1/D	Tmin	0,727	0,000005	[0,50; 0,86]

Аналіз результатів. Найсильніші зв'язки виявлено з мінімальною температурою (Tmin). Індекс домінування (D) сильно негативно корелює з температурою, тоді як індекс Шеннона (H) та обернені індекси Сімпсона (1-D, 1/D) демонструють виражену позитивну кореляцію. Це свідчить про зростання рівня біорізноманіття при підвищенні температурного фону, особливо мінімальних температур.

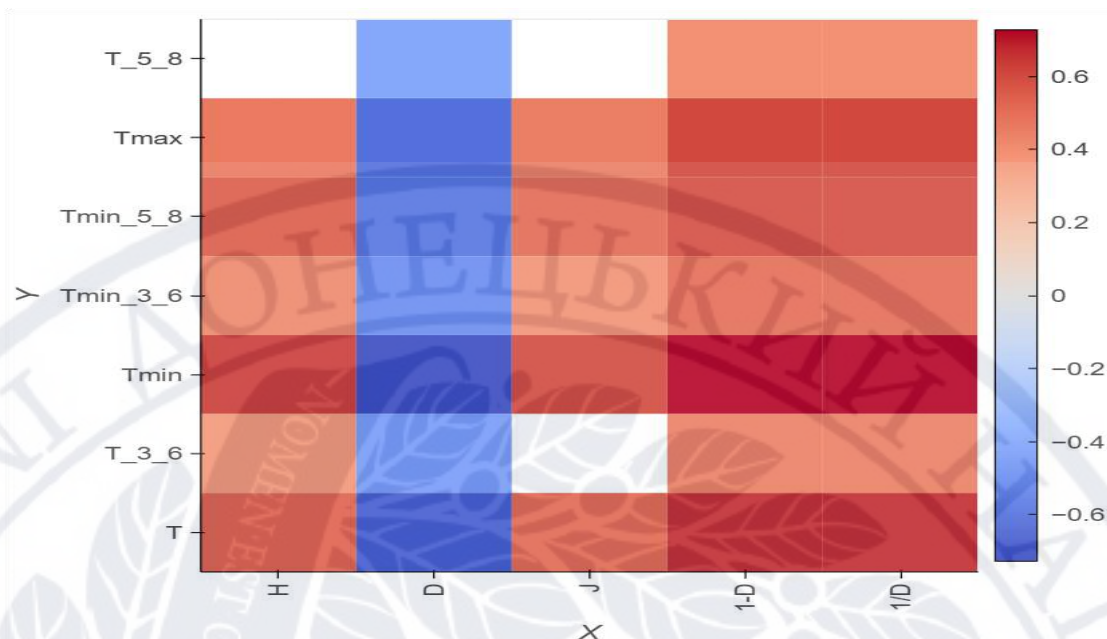


Рис. 3.6. Теплова карта кореляцій Спірмена між показниками біорізноманіття та температурними змінними

Таблиця 3.5. Кореляція Спірмена між показниками біорізноманіття та вегетаційними індексами ($|r| > 0,5$; $p < 0,05$)

Показник біорізноманіття	Веgetаційний індекс	r	p-unc	95% довірчий інтервал
H	NDWI	-0,643	0,000709	[-0,83; -0,32]
N	NDVI	-0,603	0,001796	[-0,81; -0,26]
N	SAVI	-0,603	0,001796	[-0,81; -0,26]
N	MSAVI	-0,594	0,002214	[-0,80; -0,25]
S	NDWI	-0,553	0,005024	[-0,78; -0,19]
1-D	NDWI	-0,525	0,008403	[-0,77; -0,15]

Продовження Таблиці 3.5.

1/D	NDWI	-0,525	0,008403	[-0,77; -0,15]
D	NDWI	0,525	0,008403	[0,15; 0,77]
H	NDVI	0,557	0,004738	[0,20; 0,78]
H	SAVI	0,557	0,004738	[0,20; 0,78]
S	MSAVI	0,574	0,003387	[0,22; 0,79]
H	MSAVI	0,590	0,002386	[0,25; 0,80]
S	NDVI	0,604	0,001786	[0,26; 0,81]
S	SAVI	0,604	0,001786	[0,26; 0,81]
N	NDWI	0,635	0,000862	[0,31; 0,83]

Аналіз результатів. Найсильніший зв'язок зафіксовано між індексом Шеннона (H) та NDWI ($r = -0,643$). Позитивні кореляції спостерігаються між кількістю видів (N) та NDWI, а також між показником S та індексами зеленості (NDVI, SAVI, MSAVI). Отримані результати вказують на суттєвий вплив умов вегетації на структуру біорізноманіття птахів.

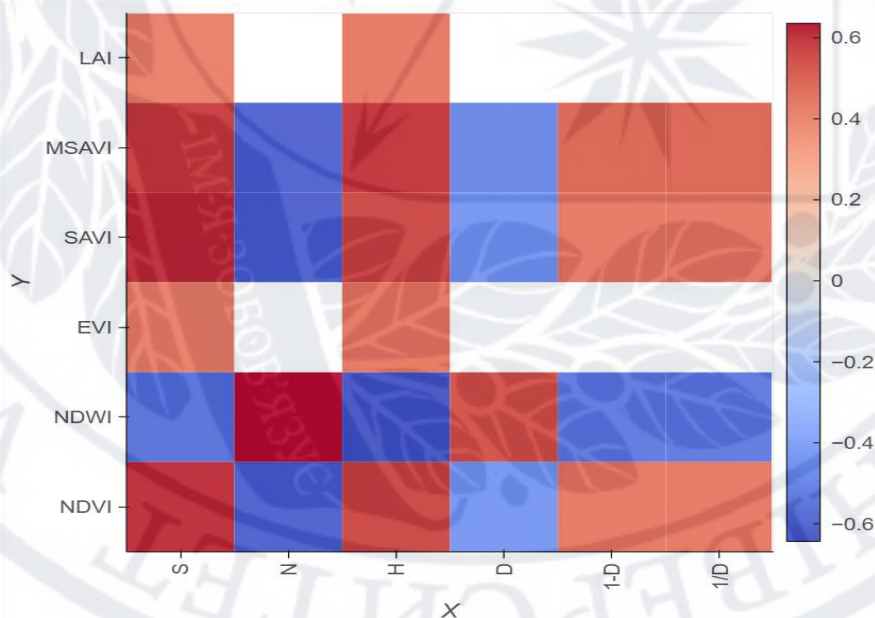


Рис. 3.7. Теплова карта кореляцій Спірмена між показниками біорізноманіття та індексами вегетації

Аналіз графіка свідчить, що найбільші абсолютні зміни рясності характерні для домінуючих видів (ліва частина графіка). Спостерігається чітке зменшення чисельності низки раніше домінантних видів, тоді як деякі інші види демонструють позитивну динаміку.

До видів зі значним негативним трендом рясності належать: *Agelaius phoeniceus* (червоноплечий чорнець), *Passer domesticus* (горобець хатній), *Colinus virginianus* (квічаль віргінський), *Sturnella magna* (лучняк східний), *Hylocichla mustelina* (дрізд лісовий), *Coccyzus americanus* (зозуля жовтохвоста).

Навпаки, стабільне або достовірне зростання чисельності протягом періоду демонструють: *Turdus migratorius* (дрізд мандрівний), *Corvus brachyrhynchos* (ворон американський), *Vireo olivaceus* (віреон червоноокий), *Spizella passerina* (вівсянка чіпінг), *Spinus tristis* (чиж золотий), *Thryothorus ludovicianus* (вільшанка каролінська).

Отримані візуальні результати підтверджують, що зниження загальної рясності угруповання супроводжується зменшенням частки домінуючих видів і підвищенням рівномірності розподілу особин між видами. Саме цей процес вирівнювання структури угруповання пояснює зростання показників біорізноманіття на тлі загального зменшення чисельності птахів.

Подальший кількісний аналіз трендів рясності для кожного виду проводився за допомогою лінійної регресії (див. підрозділ 3.2.2).

3.2.2. Тренди рясності окремих видів за результатами лінійної регресії

Для кількісної оцінки напрямку та швидкості змін рясності кожного виду протягом досліджуваного періоду було застосовано лінійну регресію часових рядів. Аналіз проведено для 383 видів. У подальшому розглянуто лише статистично значущі тренди ($p\text{-value} < 0,05$) з абсолютним значенням коефіцієнта нахилу (slope) більше 50 особин на рік.

Таблиця 3.6. Види птахів з найбільш вираженими значущими трендами рясності ($|\text{slope}| > 50$, $p < 0,05$), відсортовані за абсолютним значенням коефіцієнта нахилу (від найбільшого до найменшого)

№	Вид (латинська назва)	slope	intercept	R ²	p-value
1	<i>Passer domesticus</i>	-638.67	1 289 913	0.9447	3.81×10^{-19}
2	<i>Agelaius phoeniceus</i>	-292.84	612 795	0.7162	3.83×10^{-9}
3	<i>Quiscalus quiscula</i>	-261.08	540 135	0.8184	6.98×10^{-12}

Продовження Таблиці 3.6.

4	<i>Colinus virginianus</i>	-169.94	342 561	0.9415	8.44×10^{-19}
5	<i>Turdus migratorius</i>	133.23	-248 207	0.6588	5.24×10^{-8}
6	<i>Sturnella magna</i>	-119.99	244 344	0.9176	1.03×10^{-16}
7	<i>Petrochelidon pyrrhonota</i>	108.73	-209 296	0.5708	1.39×10^{-6}
8	<i>Corvus brachyrhynchos</i>	105.95	-195 774	0.3695	3.66×10^{-4}
9	<i>Spinus tristis</i>	89.54	-174 490	0.8315	2.42×10^{-12}
10	<i>Cardinalis cardinalis</i>	88.69	-168 766	0.8901	5.89×10^{-15}
11	<i>Thryothorus ludovicianus</i>	81.79	-160 375	0.8195	6.39×10^{-12}
12	<i>Haemorhous mexicanus</i>	81.70	-159 835	0.4849	1.92×10^{-5}
13	<i>Spizella passerina</i>	77.62	-149 416	0.8715	5.31×10^{-14}
14	<i>Zenaida macroura</i>	76.63	-140 320	0.4725	2.72×10^{-5}
15	<i>Hirundo rustica</i>	-75.54	158 930	0.5226	6.41×10^{-6}
16	<i>Vireo olivaceus</i>	72.16	-138 257	0.8188	6.75×10^{-12}
17	<i>Sialia sialis</i>	60.65	-119 159	0.8380	1.39×10^{-12}
18	<i>Baeolophus bicolor</i>	59.14	-114 815	0.7792	1.10×10^{-10}
19	<i>Columba livia</i>	-50.58	104 720	0.6885	1.44×10^{-8}
20	<i>Chaetura pelagica</i>	-50.39	103 466	0.6497	7.62×10^{-8}

Примітка: slope — коефіцієнт нахилу (особин/рік), intercept — вільний член регресії, R^2 — коефіцієнт детермінації, p-value — рівень значущості.

Для перших десяти видів з найбільшими абсолютними значеннями коефіцієнта нахилу було побудовано графіки часових рядів рясності (Рис. 3.9).

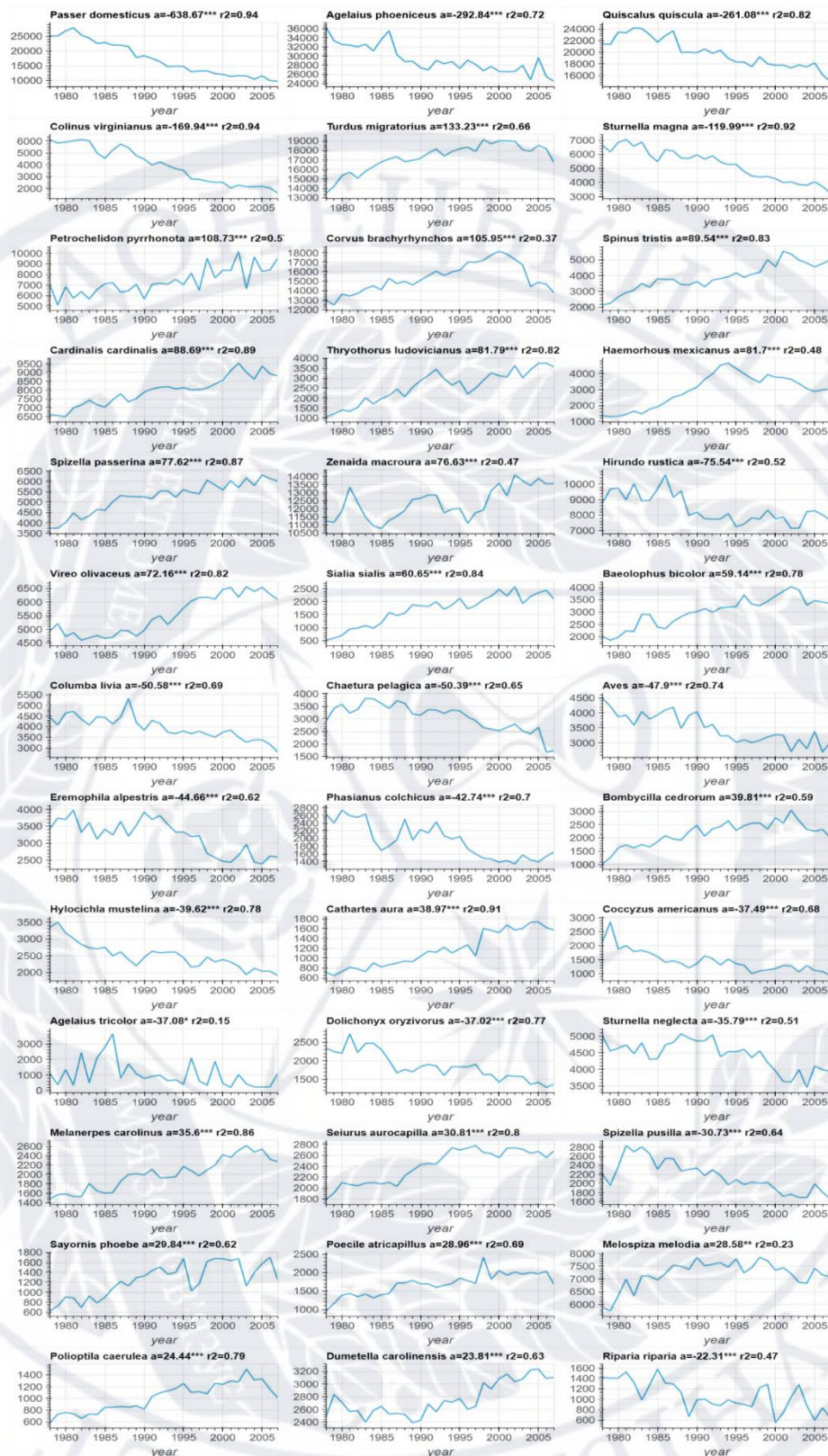


Рис. 3.9. Часові ряди рясності видів птахів з найбільш вираженими трендами. Кожен субплот відповідає окремому виду. По осі абсцис — роки досліджень, по осі ординат — рясність (кількість особин). У заголовку кожного субплоту наведено назву виду та параметри лінійної регресії: нахил (slope) та коефіцієнт детермінації (R^2).

Аналіз результатів свідчить про суттєве зменшення рясності низки раніше домінуючих видів: *Passer domesticus* (горобець хатній, slope = -638,67), *Agelaius phoeniceus* (червоноплечий чорнець), *Quiscalus quiscula* (грак звичайний) та *Colinus virginianus* (квічаль віргінський). Водночас спостерігається значне зростання чисельності видів *Turdus migratorius* (дрізд мандрівний), *Petrochelidon pyrrhonota*, *Corvus brachyrhynchos* (ворон американський), *Spinus tristis* (чиж золотий), *Cardinalis cardinalis* та *Thryothorus ludovicianus*.

Припущення щодо причин змін чисельності. Зниження рясності видів, таких як *Passer domesticus*, пов'язане з урбанізацією, змінами сільськогосподарських практик (зменшення розсипаного зерна), конкуренцією та збільшенням чисельності хижаків (наприклад, яструбів роду *Accipiter*). Для *Agelaius phoeniceus* та *Colinus virginianus* головними факторами є втрата природних луків, вологих угідь, інтенсифікація землеробства та зміни клімату.

Зростання чисельності *Turdus migratorius*, *Corvus brachyrhynchos* та інших видів пояснюється їхньою високою адаптивністю до антропогенних ландшафтів. Ці види добре використовують субурбанізовані території, годівниці та зелені насадження в містах і є толерантними до присутності людини. Такі види часто називають «urban adapters» або «winners» у процесах біотичної гомогенізації.

Висновок. Виявлені тренди підтверджують процес біотичної гомогенізації угруповання птахів. Зменшення домінування кількох раніше надмірно численних видів (зокрема інвазивних або агрофіільних) та одночасне зростання рясності більш адаптивних видів призводить до більш рівномірного розподілу особин між видами. Це пояснює одночасне зниження загальної рясності угруповання (N) на гамма-рівні та зростання індексів біорізноманіття — H (індекс Шеннона), J (вирівняність Піелу) та індексів Сімпсона (1-D, 1/D). Таким чином, зростання різноманіття відбувається не за рахунок появи нових видів, а через вирівнювання структури домінування в умовах загального зменшення чисельності птахів.

3.2.3 Кореляційний аналіз часових рядів рясності видів птахів Північної Америки

Для оцінки спільних тенденцій та синхронності динаміки популяцій було проведено кореляційний аналіз (кореляція Спірмена) між часовими рядами рясності окремих видів птахів на території всієї Північної Америки.

У таблиці 3.7 представлено пари видів, які демонструють найсильніші статистичні зв'язки ($|r| > 0,93$, $p < 0,05$).

Таблиця 3.7. Пари видів птахів з найвищими коефіцієнтами кореляції Спірмена ($|r| > 0,93$, $p < 0,05$) за ясністю у часових рядах. Відсортовано за абсолютним значенням r .

X	Y	r	CI95%	p-unc
<i>Rostrhamus sociabilis</i>	<i>Tyrannus melancholicus</i>	1.000000	[1.0, 1.0]	0.000000
<i>Meleagris gallopavo</i>	<i>Passer domesticus</i>	-0.979637	[-0.99 -0.96]	0.000000
<i>Colinus virginianus</i>	<i>Passer domesticus</i>	0.977308	[0.95 0.99]	0.000000
<i>Colinus virginianus</i>	<i>Sturnella magna</i>	0.975083	[0.95 0.99]	0.000000
<i>Colinus virginianus</i>	<i>Meleagris gallopavo</i>	-0.967620	[-0.98 -0.93]	0.000000
<i>Passer domesticus</i>	<i>Sturnella magna</i>	0.962625	[0.92 0.98]	0.000000
<i>Meleagris gallopavo</i>	<i>Sturnella magna</i>	-0.958273	[-0.98 -0.91]	0.000000
<i>Haliaeetus leucocephalus</i>	<i>Passer domesticus</i>	-0.957925	[-0.98 -0.91]	0.000000
<i>Cathartes aura</i>	<i>Spizella passerina</i>	0.951947	[0.9 0.98]	0.000000

Продовження Таблиці 3.7.

<i>Colaptes auratus</i>	<i>Sturnella magna</i>	0.950612	[0.9 0.98]	0.000000
<i>Colinus virginianus</i>	<i>Toxostoma rufum</i>	0.948387	[0.89 0.98]	0.000000
<i>Colinus virginianus</i>	<i>Melanerpes erythrocephalus</i>	0.946490	[0.89 0.97]	0.000000
<i>Cathartes aura</i>	<i>Passer domesticus</i>	- 0.945717	[-0.97 0.89]	- 0.000000
<i>Contopus cooperi</i>	<i>Spizella passerina</i>	- 0.944568	[-0.97 0.89]	- 0.000000
<i>Cathartes aura</i>	<i>Colinus virginianus</i>	- 0.942603	[-0.97 0.88]	- 0.000000
<i>Colaptes auratus</i>	<i>Passer domesticus</i>	0.940823	[0.88 0.97]	0.000000
<i>Cathartes aura</i>	<i>Meleagris gallopavo</i>	0.939579	[0.88 0.97]	0.000000
<i>Cardinalis cardinalis</i>	<i>Thryothorus ludovicianus</i>	0.939043	[0.87 0.97]	0.000000
<i>Cardinalis cardinalis</i>	<i>Cathartes aura</i>	0.939043	[0.87 0.97]	0.000000
<i>Meleagris gallopavo</i>	<i>Quiscalus quiscula</i>	- 0.936345	[-0.97 0.87]	- 0.000000
<i>Cardinalis cardinalis</i>	<i>Passer domesticus</i>	- 0.935929	[-0.97 0.87]	- 0.000000

Продовження Таблиці 3.7.

<i>Haliaeetus leucocephalus</i>	<i>Meleagris gallopavo</i>	0.935865	[0.87 0.97]	0.000000
<i>Meleagris gallopavo</i>	<i>Spizella passerina</i>	0.935351	[0.87 0.97]	0.000000
<i>Colaptes auratus</i>	<i>Colinus virginianus</i>	0.934594	[0.87 0.97]	0.000000
<i>Melanerpes erythrocephalus</i>	<i>Sturnella magna</i>	0.933808	[0.86 0.97]	0.000000
<i>Colaptes auratus</i>	<i>Meleagris gallopavo</i>	- 0.933126	[-0.97 0.86]	- 0.000000
<i>Colinus virginianus</i>	<i>Lanius ludovicianus</i>	0.932814	[0.86 0.97]	0.000000
<i>Cathartes aura</i>	<i>Contopus cooperi</i>	- 0.930989	[-0.97 0.86]	- 0.000000
<i>Passer domesticus</i>	<i>Quiscalus quiscula</i>	0.930693	[0.86 0.97]	0.000000
<i>Lanius ludovicianus</i>	<i>Sturnella magna</i>	0.930145	[0.86 0.97]	0.000000

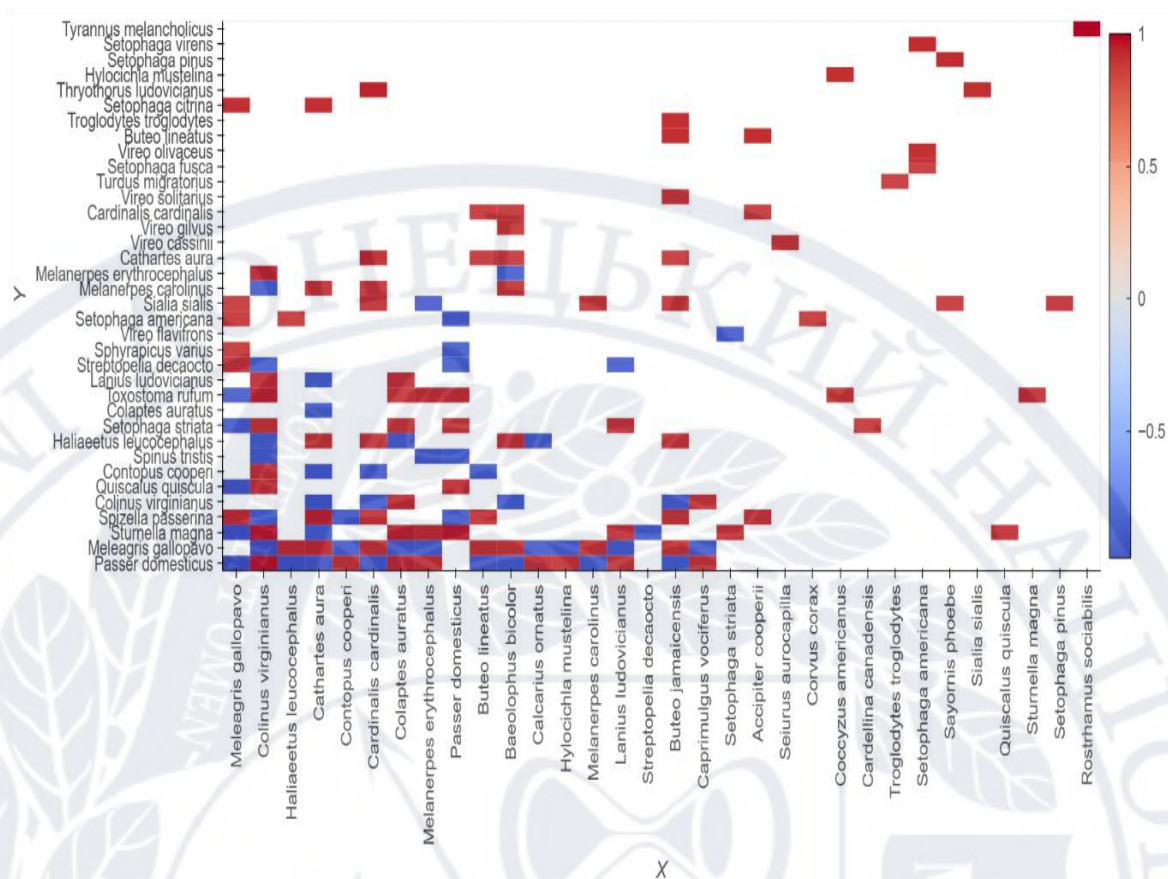


Рис. 3.10. Теплова карта коефіцієнтів кореляції Спірмена між явністю видів птахів Північної Америки для пар з $|r| > 0,9$ та $p < 0,05$. Колірна шкала: coolwarm (червоний — позитивна кореляція, синій — негативна).

Для наочної візуалізації динаміки були побудовані часові ряди нормованих значень явності (z-score) для пар видів з найсильнішими кореляціями.

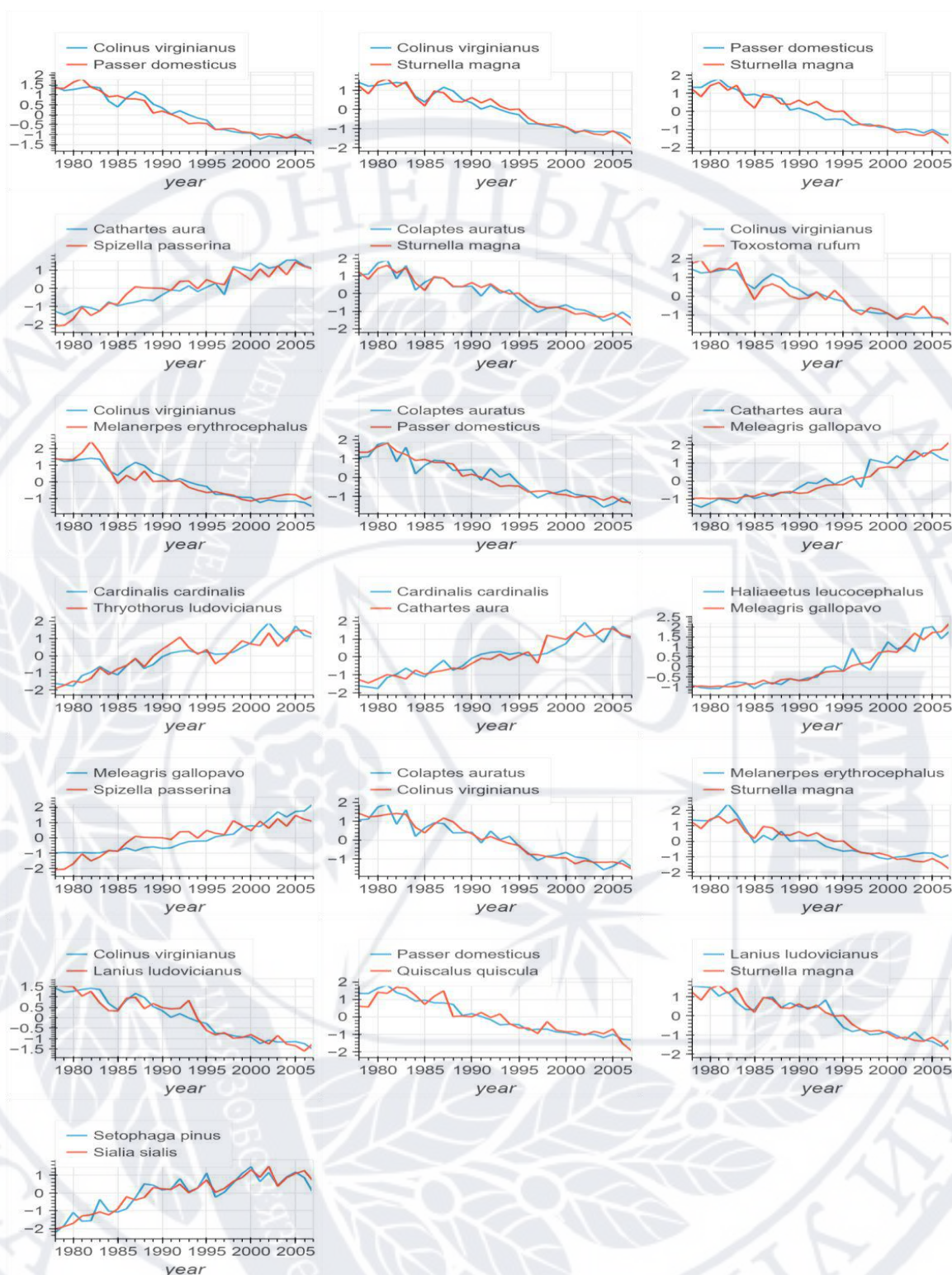


Рис. 3.11. Нормовані часові ряди рясності пар видів птахів з найвищими позитивними коефіцієнтами кореляції Спірмена. Кожен субплот відображає пару видів, часові ряди яких демонструють виражену синхронність, у тому числі на рівні річних флуктуацій.

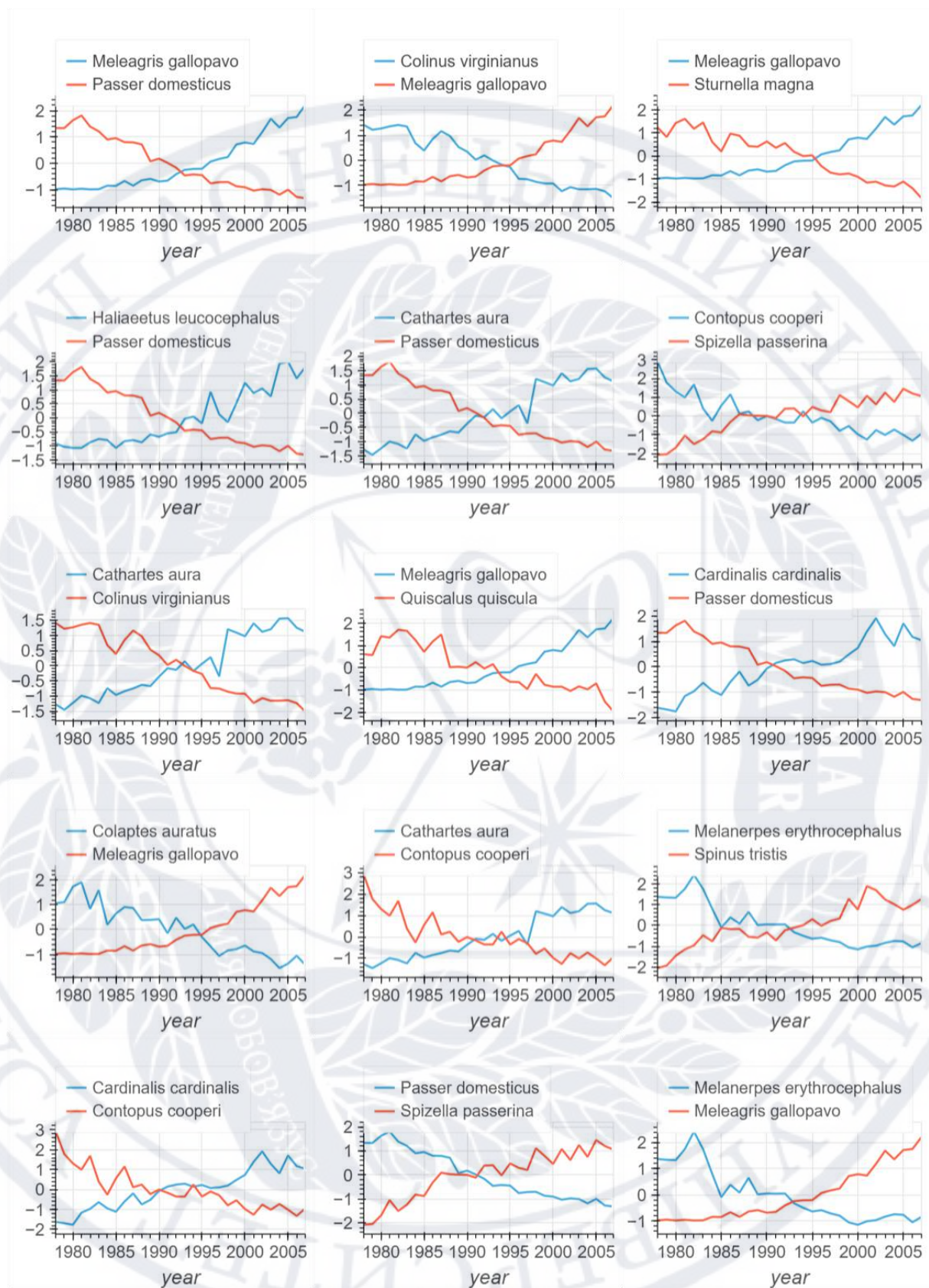


Рис. 3.12. Нормовані часові ряди рясності пар видів птахів з найвищими негативними коефіцієнтами кореляції Спірмена.

Аналіз виявив надзвичайно сильні як позитивні, так і негативні кореляції між рясністю різних видів птахів. Найвищі позитивні кореляції спостерігаються між видами, пов'язаними з відкритими та напіввідкритими ландшафтами: *Colinus virginianus*, *Sturnella magna*, *Passer domesticus*, *Toxostoma rufum*, *Melanerpes erythrocephalus*, *Colaptes auratus* та іншими. Часові ряди цих видів демонструють чітку синхронність, включаючи «шумові» річні коливання: зростання або зменшення чисельності одного виду в конкретний рік, як правило, супроводжується аналогічною зміною в іншого.

Особливо виражені позитивні зв'язки відмічені для таких пар, як:

- *Colinus virginianus* – *Passer domesticus*
- *Colinus virginianus* – *Sturnella magna*
- *Passer domesticus* – *Sturnella magna*
- *Cathartes aura* – *Spizella 38asserine*
- *Colaptes auratus* – *Sturnella magna* та ін.

Негативні кореляції найбільш характерні для пар, до складу яких входить *Meleagris gallopavo* (дикий індик), що може свідчити про протилежні тренди динаміки популяцій цього виду порівняно з багатьма представниками відкритих ландшафтів.

Отримані результати вказують на наявність спільних масштабних драйверів динаміки популяцій птахів на континентальному рівні. Позитивні кореляції ймовірно зумовлені спільною реакцією видів на зміни землекористування, кліматичні умови (опаді, температура зимового періоду) та доступність кормових ресурсів. Негативні кореляції можуть відображати протилежні екологічні преференції (лісові vs. Відкриті біотопи) та різні відповіді на процеси відновлення лісів і інтенсифікацію сільського господарства.

Таким чином, сильні кореляційні зв'язки підтверджують, що популяції багатьох видів птахів Північної Америки зазнають синхронного впливу крупномасштабних екологічних факторів.

3.2.4 Кореляційний аналіз між рясністю видів птахів та кліматичними показниками

Для виявлення можливого впливу кліматичних факторів на динаміку популяцій птахів проведено кореляційний аналіз Спірмена між часовими рядами рясності окремих видів (по всіх точках спостереження на території Північної Америки) та часовими рядами кліматичних показників.

У таблиці 3.8 наведено пари «вид – кліматичний показник» з найсильнішими позитивними кореляціями ($r > 0,6$, $p < 0,05$).

Таблиця 3.8. Пари видів птахів та кліматичних показників з найвищими коефіцієнтами кореляції Спірмена ($r > 0,6$, $p < 0,05$). Відсортовано за значенням r .

X	Y	r	CI95%	p-unc
<i>Sayornis phoebe</i>	T	0.700156	[0.45 0.85]	0.000017
<i>Thryothorus ludovicianus</i>	Tmin	0.696407	[0.45 0.84]	0.000019
<i>Thryothorus ludovicianus</i>	T	0.686172	[0.43 0.84]	0.000028
<i>Accipiter cooperii</i>	Tmin	0.673363	[0.41 0.83]	0.000045
<i>Crotophaga sulcirostris</i>	wet_3_6	0.664786	[0.4 0.83]	0.000061
<i>Sayornis phoebe</i>	Tmin	0.660659	[0.39 0.82]	0.000071
<i>Crotophaga sulcirostris</i>	pre_5_8	0.644310	[0.37 0.82]	0.000122
<i>Cistothorus platensis</i>	T	0.642563	[0.37 0.81]	0.000129
<i>Cardinalis cardinalis</i>	Tmin	0.640783	[0.36 0.81]	0.000136
<i>Crotophaga sulcirostris</i>	pre_3_6	0.633845	[0.35 0.81]	0.000170
<i>Melanerpes carolinus</i>	Tmin_5_8	0.626544	[0.34 0.81]	0.000212
<i>Ammodramus maritimus</i>	T	0.625488	[0.34 0.8]	0.000219
<i>Sayornis phoebe</i>	Tmin_5_8	0.621940	[0.34 0.8]	0.000243
<i>Buteo jamaicensis</i>	Tmin_5_8	0.621649	[0.34 0.8]	0.000246
<i>Sitta carolinensis</i>	T	0.621426	[0.34 0.8]	0.000247
<i>Cistothorus platensis</i>	Tmin	0.621204	[0.34 0.8]	0.000249
<i>Ammodramus maritimus</i>	Tmin	0.618470	[0.33 0.8]	0.000270
<i>Accipiter cooperii</i>	T	0.610667	[0.32 0.8]	0.000338

X	Y	r	CI95%	p-unc
<i>Spizella passerina</i>	Tmin_5_8	0.605629	[0.31 0.79]	0.000391

Продовження Таблиці 3.8.

<i>Cathartes aura</i>	Tmin	0.603849	[0.31 0.79]	0.000411
<i>Sitta carolinensis</i>	Tmin	0.602292	[0.31 0.79]	0.000429
<i>Accipiter cooperii</i>	Tmin_5_8	0.601966	[0.31 0.79]	0.000433
<i>Vireo solitarius</i>	Tmin_5_8	0.601113	[0.31 0.79]	0.000443
<i>Buteo jamaicensis</i>	T	0.600734	[0.31 0.79]	0.000448
<i>Sialia sialis</i>	Tmin	0.600512	[0.31 0.79]	0.000451

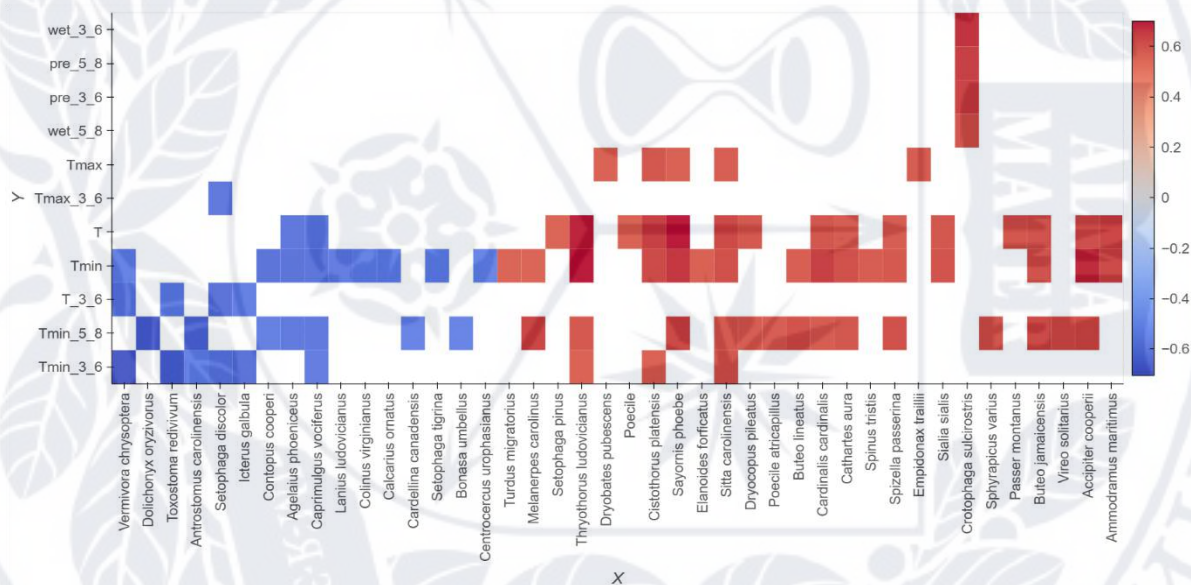


Рис. 3.13. Теплова карта коефіцієнтів кореляції Спірмена між рясністю видів птахів та кліматичними показниками для пар з $|r| > 0,55$ та $p < 0,05$. Колірна шкала: coolwarm (червоний — позитивна кореляція, синій — негативна).

Для візуалізації динаміки взаємозв'язків побудовано часові ряди нормованих значень (z-score).

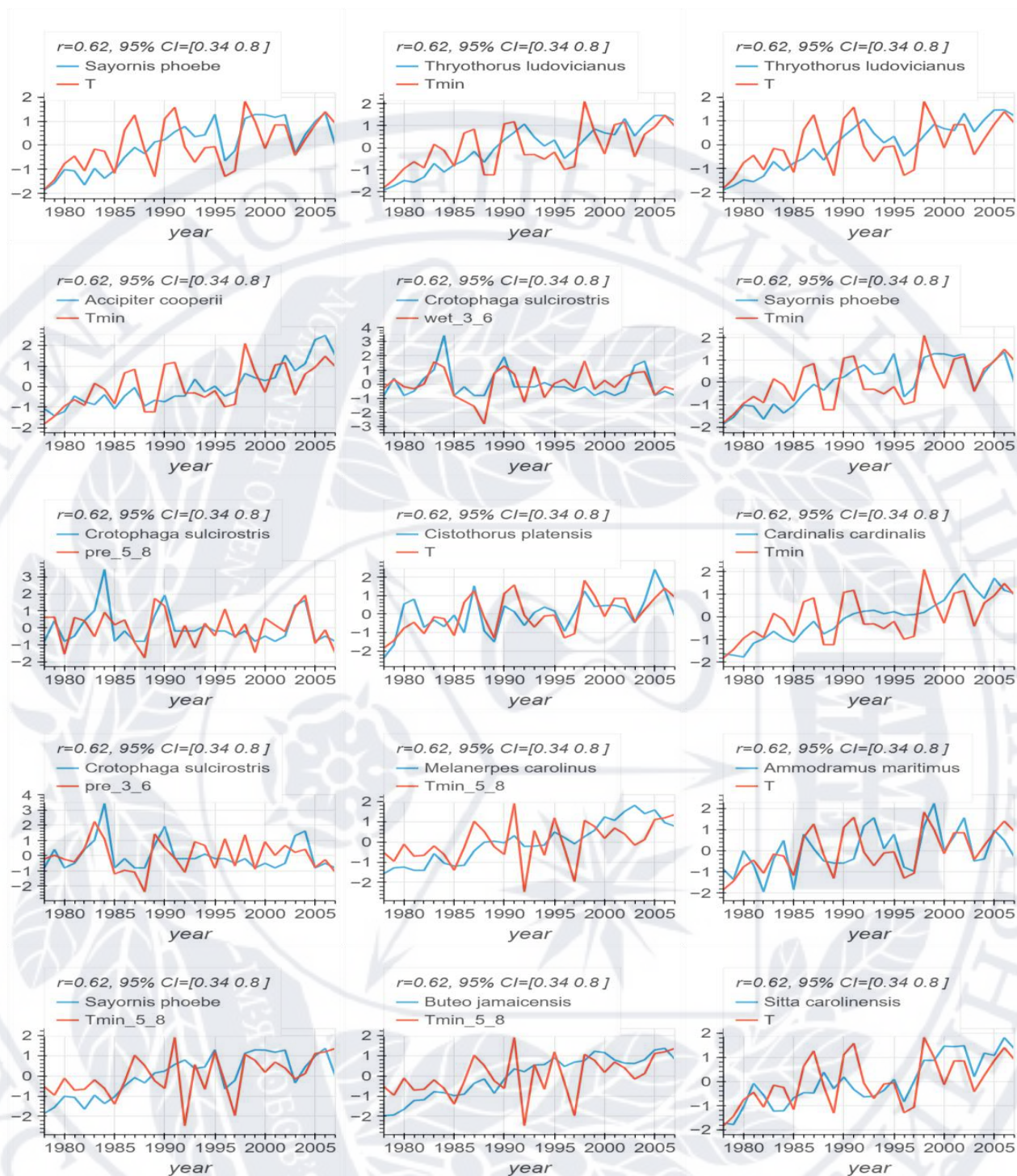


Рис. 3.14. Нормовані часові ряди рясності видів птахів та кліматичних показників для пар з найвищими позитивними коефіцієнтами кореляції Спірмена. Кожен субплот містить два нормованих ряди, легенду з назвою пари, коефіцієнт кореляції та 95% довірчий інтервал. Показано 15 пар з найсильнішими позитивними зв'язками.

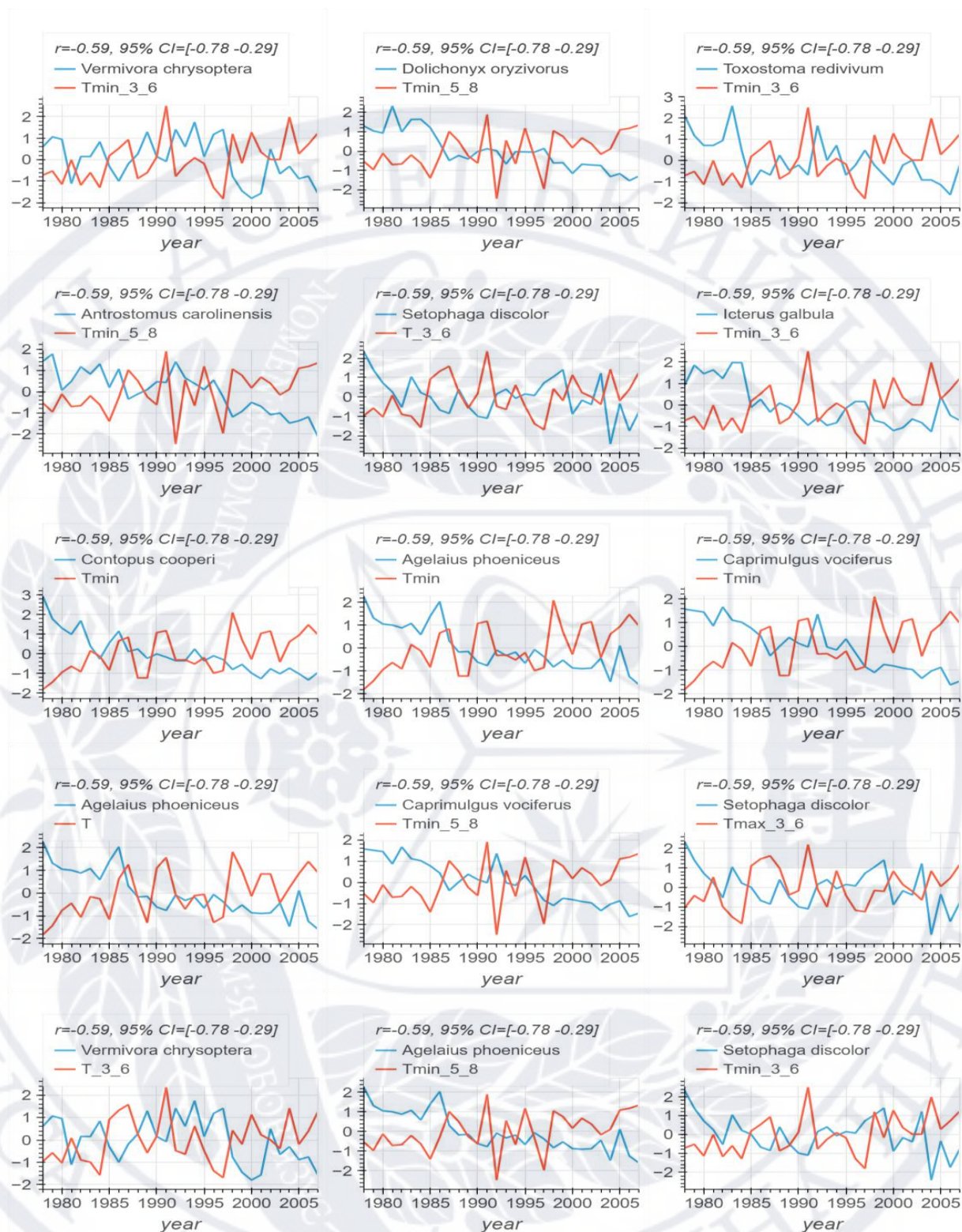


Рис. 3.15. Нормовані часові ряди рясності видів птахів та кліматичних показників для пар з найвищими негативними коефіцієнтами кореляції Спірмена (аналогічна структура, 15 субплотів).

Аналіз виявив численні статистично значущі кореляції середньої та високої сили між рясністю птахів і кліматичними змінними. Найбільшу кількість кореляцій з $|r| > 0,5$ демонструють температурні показники: середньомісячна мінімальна температура (T_{min}), мінімальна температура за періоди 3–6 та 5–8 місяців ($T_{min_3_6}$, $T_{min_5_8}$), а також середня температура (T). Це свідчить про особливу чутливість динаміки популяцій птахів до температурного режиму, особливо до зимових мінімумів і температур весняно-літнього періоду.

Серед видів з найсильнішими позитивними кореляціями чітко вирізняються *Sayornis phoebe*, *Thryothorus ludovicianus*, *Crotophaga sulcirostris*, *Cistothorus platensis*, *Cardinalis cardinalis*, *Ammodramus maritimus*, *Sitta carolinensis* та *Melanerpes carolinus*. Для багатьох з них часові ряди демонструють синхронність не лише в загальному тренді, але й на рівні річних «шумових» флуктуацій (наприклад, *Sayornis phoebe* – T , *Crotophaga sulcirostris* – wet_3_6 та показники опадів, *Cistothorus platensis* – T , *Cardinalis cardinalis* – T_{min}).

Порівняння з попереднім аналізом лінійних трендів рясності показує, що серед видів з найбільшими коефіцієнтами нахилу (найбільш впливовими на загальні зміни гамма-різноманіття) є декілька видів, чутливих до кліматичних показників — зокрема *Sayornis phoebe*, *Thryothorus ludovicianus*, *Cardinalis cardinalis*, *Cathartes aura* та *Sitta carolinensis*. Це дозволяє зробити висновок, що кліматичні зміни (передусім потепління та зміни режиму опадів) істотно впливають на загальні тренди біорізноманіття птахів Північної Америки саме через вплив на ключові види, які визначають сумарну динаміку орнітофауни.

Позитивні кореляції з мінімальними температурами узгоджуються з екологічними особливостями видів: м'якші зими знижують смертність, покращують доступність корму в холодний період і сприяють розширенню ареалів на північ для осілих та коротко-мігруючих видів.

3.2.5 Кореляційний аналіз між рясністю видів птахів та індексами вегетації

Для оцінки впливу стану рослинного покриву на динаміку популяцій птахів проведено кореляційний аналіз Спірмена між часовими рядами рясності видів (по всіх точках спостереження на території Північної Америки) та часовими рядами основних індексів вегетації (NDVI, NDWI, SAVI, MSAVI).

У таблиці 3.9 наведено пари «вид – індекс вегетації» з найсильнішими позитивними кореляціями ($r > 0,7$, $p < 0,05$).

Таблиця 3.9. Пари видів птахів та індексів вегетації з найвищими коефіцієнтами кореляції Спірмена ($r > 0,7$, $p < 0,05$). Відсортовано за значенням r .

X	Y	r	CI95%	p-unc
<i>Phasianus colchicus</i>	NDWI	0.852174	[0.68 0.93]	0.000000
<i>Lanius ludovicianus</i>	NDWI	0.828696	[0.64 0.92]	0.000001
<i>Melanerpes</i>	NDWI	0.821048	[0.62 0.92]	0.000001
<i>Archilochus colubris</i>	MSAVI	0.808872	[0.6 0.91]	0.000002
<i>Sturnella magna</i>	NDWI	0.796522	[0.58 0.91]	0.000003
<i>Archilochus colubris</i>	SAVI	0.788867	[0.57 0.9]	0.000005
<i>Archilochus colubris</i>	NDVI	0.788867	[0.57 0.9]	0.000005
<i>Xanthocephalus</i>	NDWI	0.784348	[0.56 0.9]	0.000006
<i>Spinus tristis</i>	MSAVI	0.784348	[0.56 0.9]	0.000006
<i>Colinus virginianus</i>	NDWI	0.784348	[0.56 0.9]	0.000006
<i>Eremophila alpestris</i>	NDWI	0.780870	[0.55 0.9]	0.000007
<i>Tyrannus tyrannus</i>	NDWI	0.780000	[0.55 0.9]	0.000007
<i>Spinus tristis</i>	SAVI	0.773043	[0.54 0.9]	0.000009
<i>Spinus tristis</i>	NDVI	0.773043	[0.54 0.9]	0.000009
<i>Passer domesticus</i>	NDWI	0.767826	[0.53 0.89]	0.000012
<i>Streptopelia decaocto</i>	MSAVI	0.762647	[0.52 0.89]	0.000015
<i>Streptopelia decaocto</i>	NDVI	0.759940	[0.51 0.89]	0.000016
<i>Streptopelia decaocto</i>	SAVI	0.759940	[0.51 0.89]	0.000016
<i>Toxostoma rufum</i>	NDWI	0.753043	[0.5 0.89]	0.000022
<i>Calcarius ornatus</i>	NDWI	0.749293	[0.5 0.89]	0.000025
<i>Spizella pusilla</i>	NDWI	0.748424	[0.49 0.88]	0.000026
<i>Chordeiles acutipennis</i>	NDWI	0.747335	[0.49 0.88]	0.000027
<i>Caprimulgus vociferus</i>	NDWI	0.746249	[0.49 0.88]	0.000028

Продовження Таблиці 3.9.

<i>Colaptes auratus</i>	NDWI	0.734783	[0.47 0.88]	0.000043
<i>Haliaeetus leucocephalus</i>	MSAVI	0.733638	[0.47 0.88]	0.000045
<i>Antrastomus carolinensis</i>	NDWI	0.733362	[0.47 0.88]	0.000046
<i>Quiscalus quiscula</i>	NDWI	0.732768	[0.47 0.88]	0.000047
<i>Setophaga virens</i>	MSAVI	0.731029	[0.46 0.88]	0.000050
<i>Poliophtila caerulea</i>	NDVI	0.729724	[0.46 0.88]	0.000052
<i>Poliophtila caerulea</i>	SAVI	0.729724	[0.46 0.88]	0.000052
<i>Haliaeetus leucocephalus</i>	SAVI	0.728854	[0.46 0.87]	0.000054
<i>Haliaeetus leucocephalus</i>	NDVI	0.728854	[0.46 0.87]	0.000054
<i>Setophaga americana</i>	MSAVI	0.727115	[0.46 0.87]	0.000057
<i>Dumetella carolinensis</i>	MSAVI	0.723478	[0.45 0.87]	0.000065
<i>Chaetura pelagica</i>	NDWI	0.722609	[0.45 0.87]	0.000067
<i>Baeolophus bicolor</i>	MSAVI	0.722609	[0.45 0.87]	0.000067
<i>Baeolophus bicolor</i>	SAVI	0.721739	[0.45 0.87]	0.000069
<i>Baeolophus bicolor</i>	NDVI	0.721739	[0.45 0.87]	0.000069
<i>Setophaga virens</i>	NDVI	0.720591	[0.45 0.87]	0.000071
<i>Setophaga virens</i>	SAVI	0.720591	[0.45 0.87]	0.000071
<i>Setophaga americana</i>	SAVI	0.720157	[0.45 0.87]	0.000072
<i>Setophaga americana</i>	NDVI	0.720157	[0.45 0.87]	0.000072
<i>Columba livia</i>	NDWI	0.715652	[0.44 0.87]	0.000084
<i>Cardellina canadensis</i>	NDWI	0.709439	[0.43 0.87]	0.000104
<i>Pooecetes gramineus</i>	NDWI	0.704348	[0.42 0.86]	0.000122
<i>Corvus corax</i>	MSAVI	0.702609	[0.42 0.86]	0.000129

Продовження Таблиці 3.9.

<i>Corvus corax</i>	SAVI	0.700870	[0.41 0.86]	0.000136
<i>Corvus corax</i>	NDVI	0.700870	[0.41 0.86]	0.000136



Рис. 3.16. Теплова карта коефіцієнтів кореляції Спірмена між ясністю видів птахів та індексами вегетації для пар з $|r| > 0,7$ та $p < 0,05$. Колірна шкала: coolwarm (червоний — позитивна кореляція, синій — негативна).

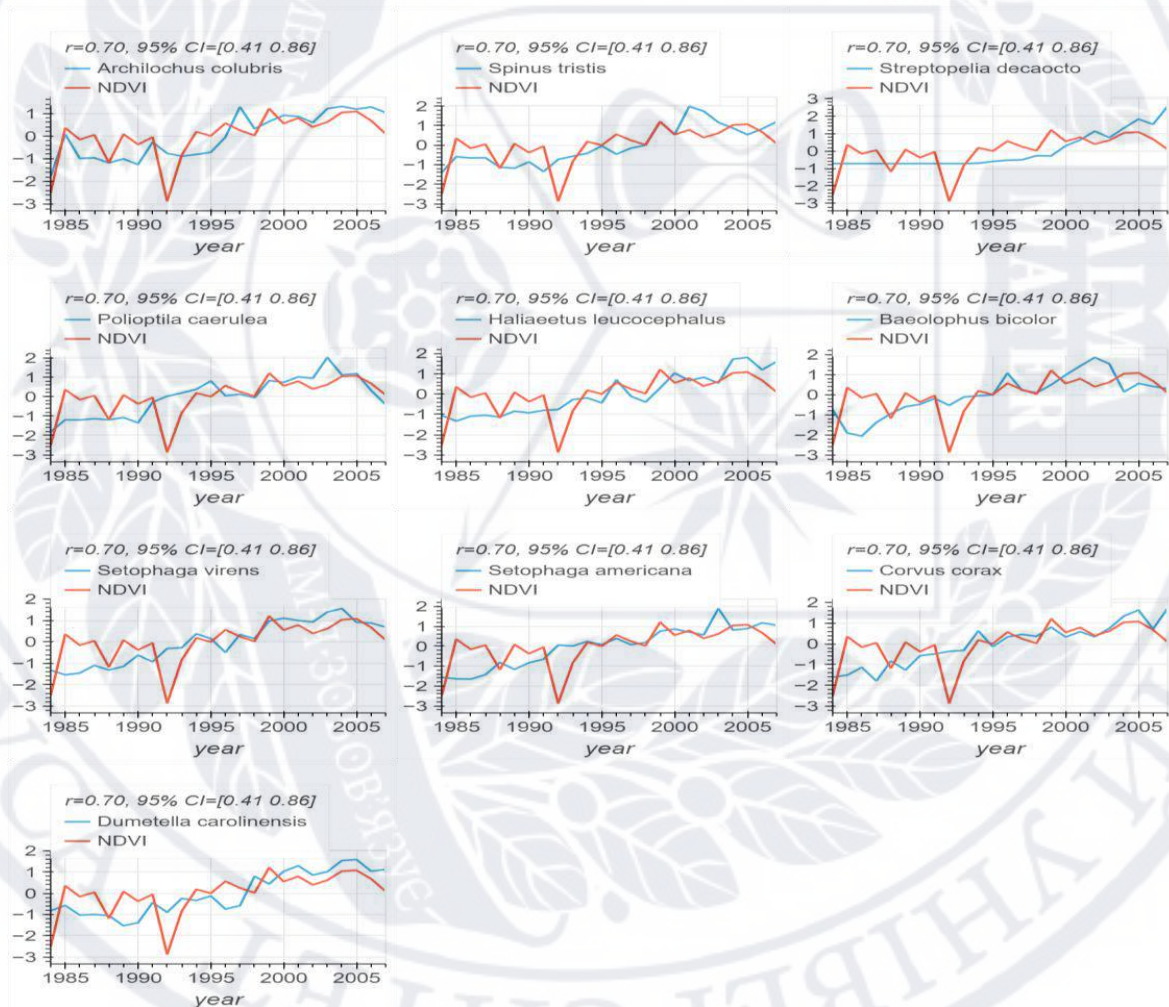


Рис. 3.17. Нормовані часові ряди ясності видів птахів та індексів вегетації для пар з найвищими позитивними коефіцієнтами кореляції Спірмена. Кожен субплот містить два нормованих часових ряди, легенду з

назвою пари, значення коефіцієнта кореляції та 95% довірчий інтервал. Показано 10 пар з найсильнішими позитивними зв'язками.

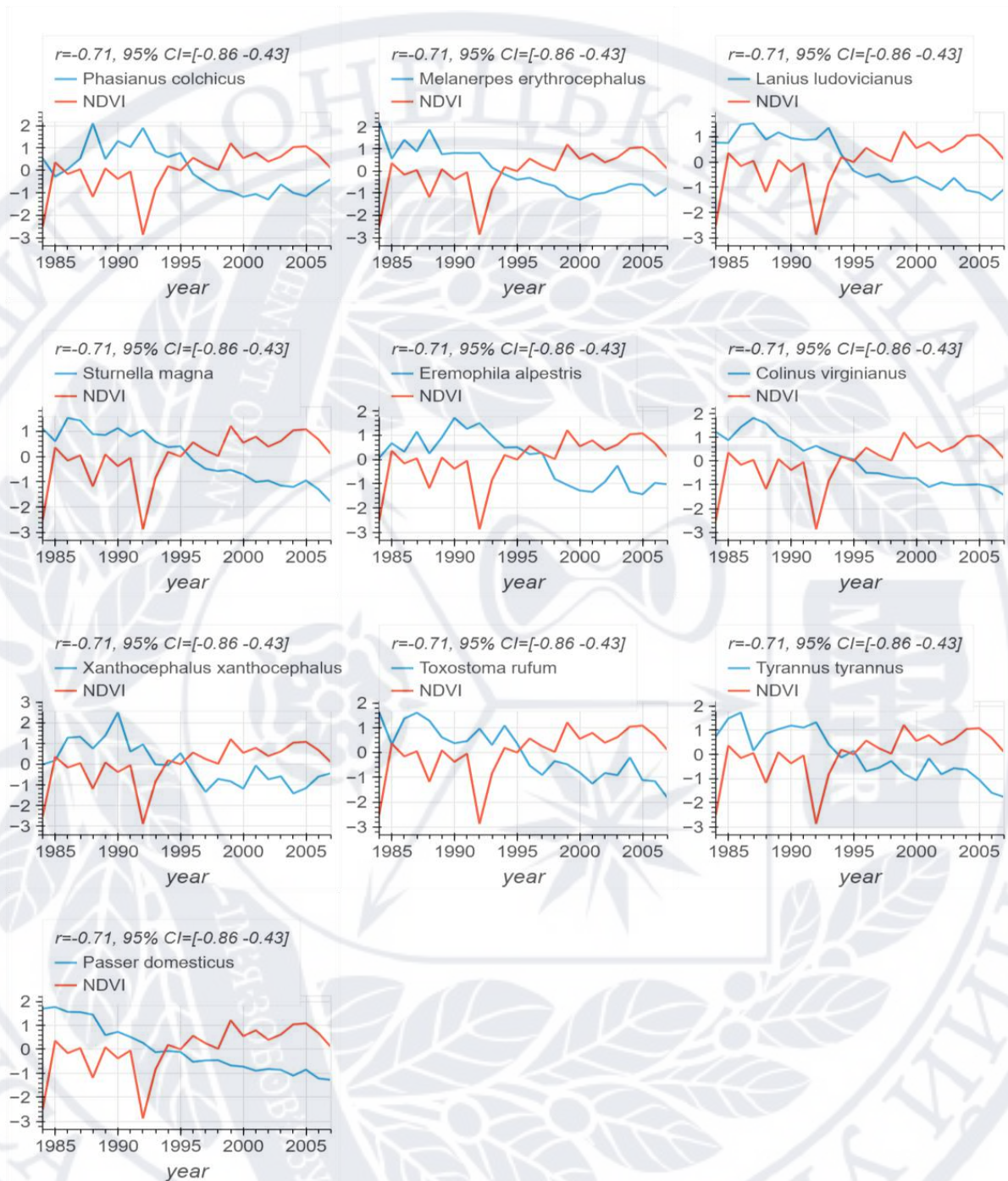


Рис. 3.18. Нормовані часові ряди рясності видів птахів та індексів вегетації для пар з найвищими негативними коефіцієнтами кореляції Спірмена (аналогічна структура, 10 субплотів).

Аналіз виявив дуже сильні позитивні кореляції між рясністю багатьох видів птахів та індексами вегетації. Найбільшу кількість кореляцій $|r| > 0,7$

демонструють NDWI, NDVI, SAVI та MSAVI. Це свідчить про високу чутливість орнітофауни Північної Америки до змін густоти, вологості та загального стану рослинного покриву.

Чітка синхронність часових рядів, у тому числі на рівні річних «шумових» флуктуацій, спостерігається у таких парах, як *Haliaeetus leucocephalus* – NDVI, *Poliophtila caerulea* – NDVI, *Baeolophus bicolor* – NDVI, *Corvus corax* – NDVI, *Setophaga americana* – NDVI, *Setophaga virens* – NDVI, *Toxostoma rufum* – NDWI, *Lanius ludovicianus* – NDWI та інших.

Такі сильні зв'язки пояснюються екологічними перевагами видів. Більшість видів з високими кореляціями (*Colinus virginianus*, *Sturnella magna*, *Lanius ludovicianus*, *Melanerpes erythrocephalus*, *Toxostoma rufum*, *Spinus tristis*, *Archilochus colubris* та ін.) тяжіють до відкритих, напіввідкритих та лучних ландшафтів, узлісь і сільськогосподарських угідь. Індекс NDWI відображає вміст вологи в рослинності та ґрунті, що безпосередньо впливає на продуктивність травостою та чисельність комах. NDVI, SAVI та MSAVI характеризують густоту й «зеленість» рослинного покриву, які визначають доступність кормових ресурсів, місць гніздування та укриття для птахів.

Зв'язок з попереднім аналізом трендів рясності. Серед видів, що мають найсильніші лінійні тренди чисельності (види з найбільшими коефіцієнтами нахилу), декілька демонструють одночасно високі кореляції з індексами вегетації. Зокрема, це *Colinus virginianus*, *Sturnella magna*, *Lanius ludovicianus*, *Melanerpes erythrocephalus*, *Toxostoma rufum*, *Colaptes auratus* та *Passer domesticus*.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що зміни рослинного покриву (як природні, так і зумовлені антропогенним впливом — інтенсифікацією сільського господарства, змінами землекористування, заростанням територій тощо) суттєво впливають на загальні тренди гамма-рівня біорізноманіття птахів Північної Америки саме через ключові види, які визначають сумарну динаміку орнітофауни.

3.3. Видоспецифічні середньозважені (за рясністю) значення кліматичних умов та показників вегетації

Для визначення характерних екологічних умов, у яких зустрічаються окремі види птахів, розраховано видоспецифічні середньозважені за рясністю значення кліматичних показників та індексів вегетації. Такий підхід дозволяє оцінити «кліматичний» та «вегетаційний» оптимум кожного виду з урахуванням його реальної чисельності в різних локаціях і роках.

Середньозважене значення для виду s та показника j обчислювалося за формулою:

$$\bar{C}_{sj} = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{ij} \cdot A_{is})}{\sum_{i=1}^n A_{is}}$$

де:

- $\bar{C}_{sj}$ — середньозважене значення показника j для виду s ;
- C_{ij} — значення кліматичного параметра або індексу вегетації j у спостереженні i ;
- A_{is} — рясність виду s у спостереженні i ;
- n — кількість спостережень (комбінацій місце-рік) для даного виду.

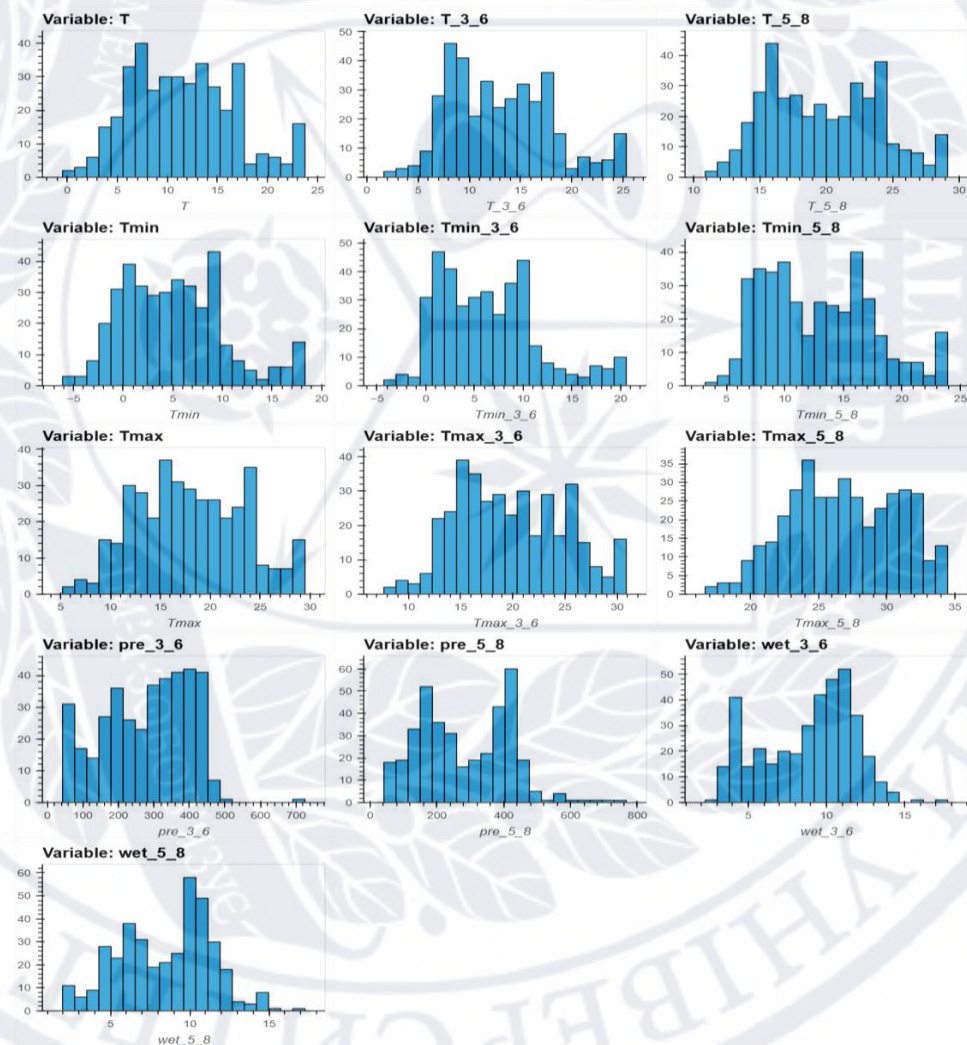


Рис. 3.19. Гістограми розподілу видоспецифічних середньозважених за рясністю значень кліматичних показників по всіх видах птахів Північної Америки.

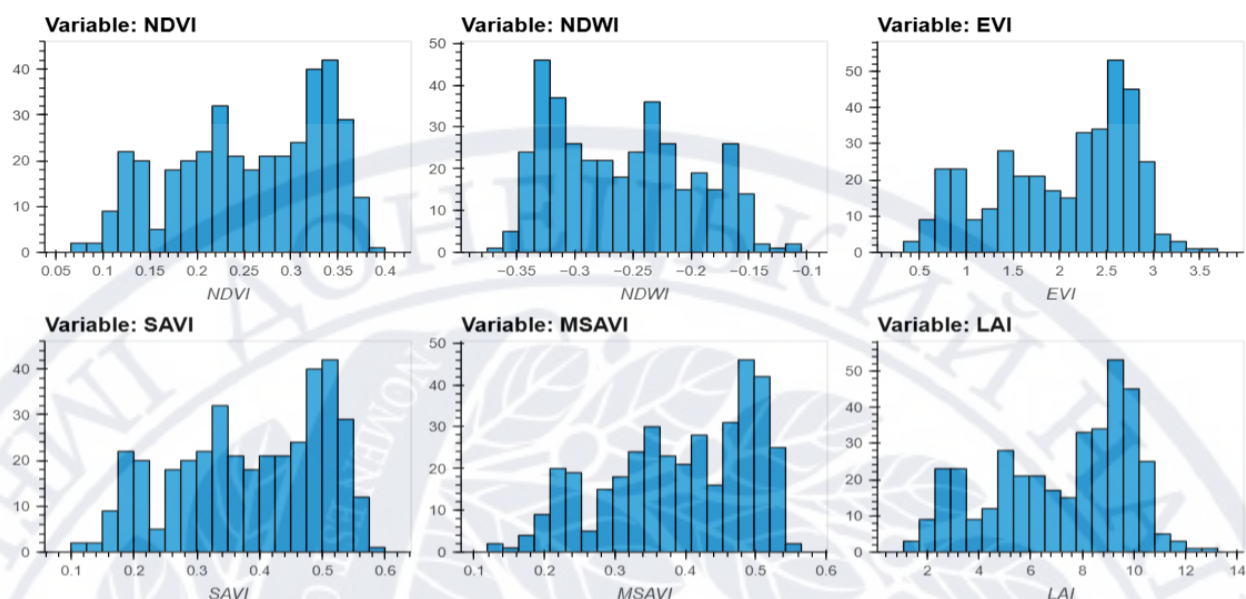


Рис. 3.20. Гістограми розподілу видоспецифічних середньозважених за рясністю значень індексів вегетації по всіх видах птахів Північної Америки.

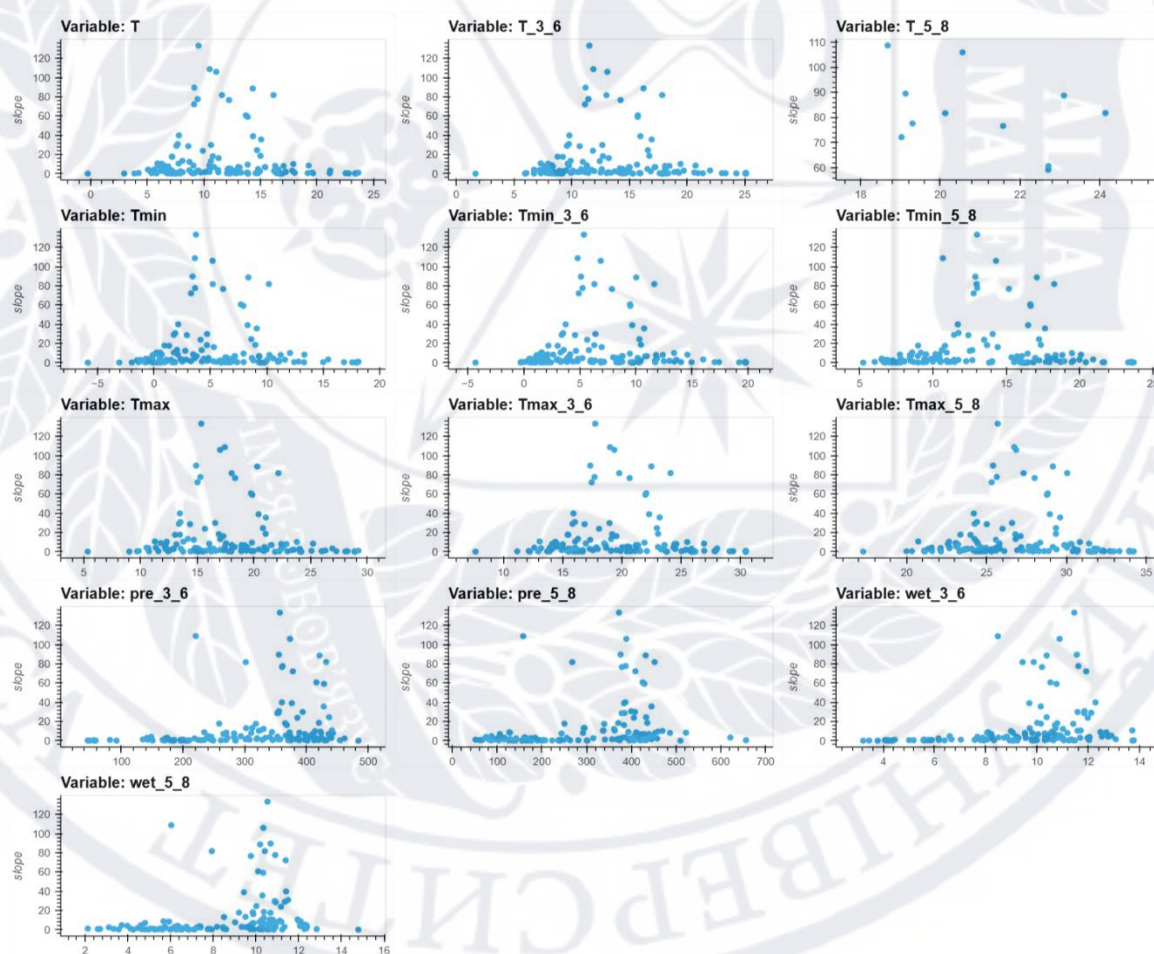


Рис. 3.21. Залежність коефіцієнта нахилу часового ряду рясності від видоспецифічного середньозваженого значення кліматичних показників (позитивні тренди, нормальний масштаб).

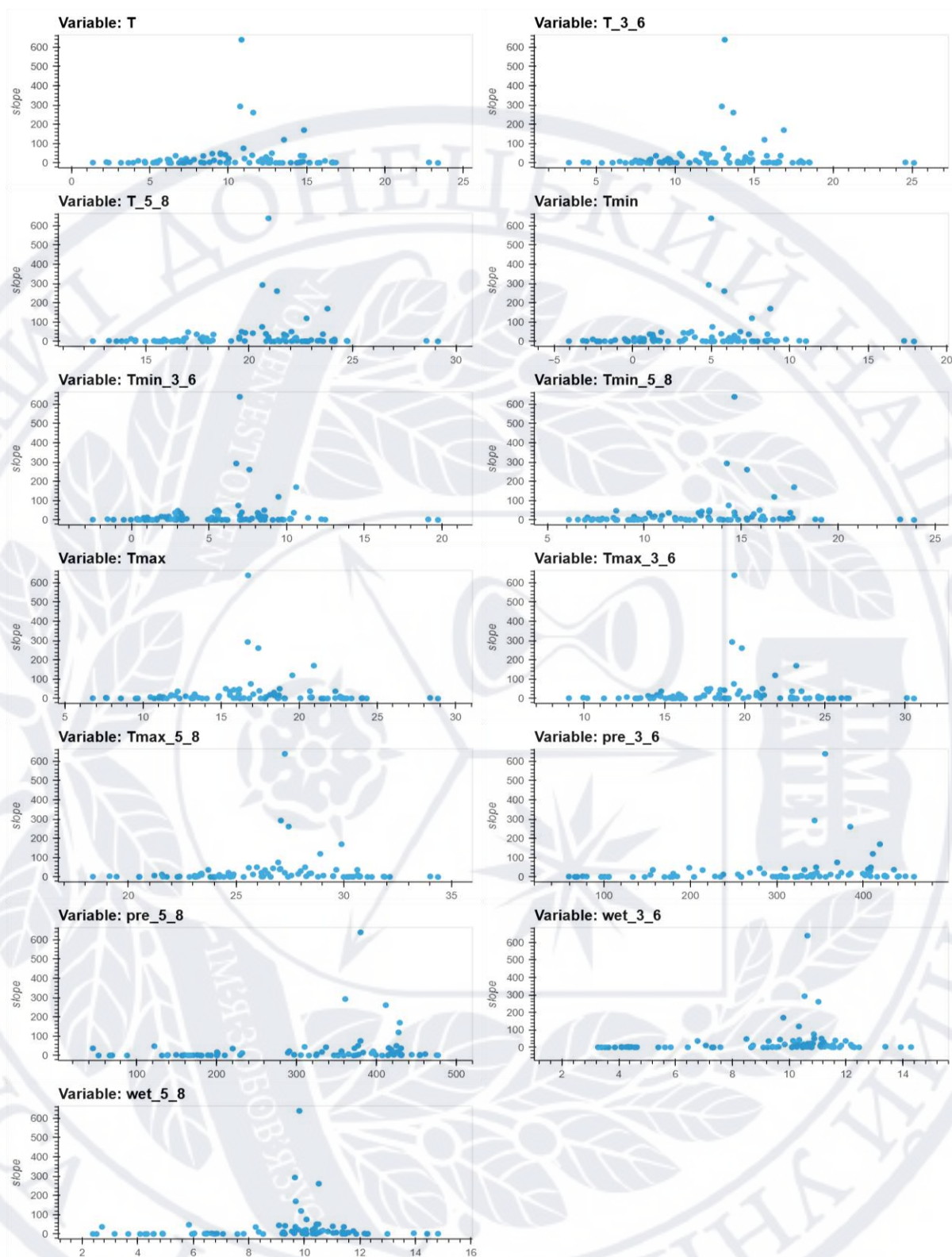


Рис. 3.22. Залежність коефіцієнта нахилу часового ряду рясності від видоспецифічного середньозваженого значення кліматичних показників (негативні тренди, модуль, нормальний масштаб).

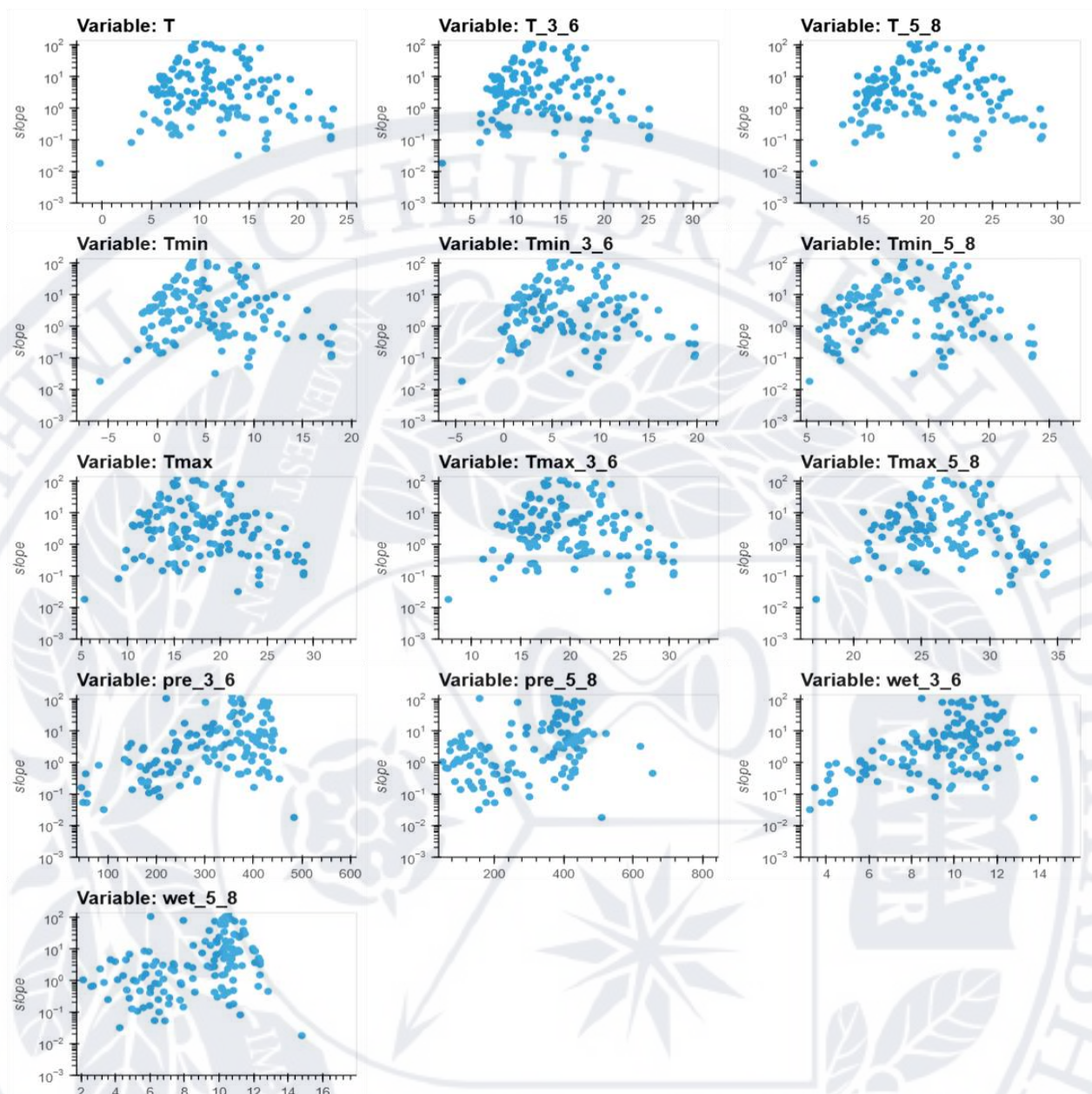


Рис. 3.23. Залежність коефіцієнта нахилу часового ряду рясності від видоспецифічного середньозваженого значення кліматичних показників (позитивні тренди, логарифмічний масштаб по осі Y).

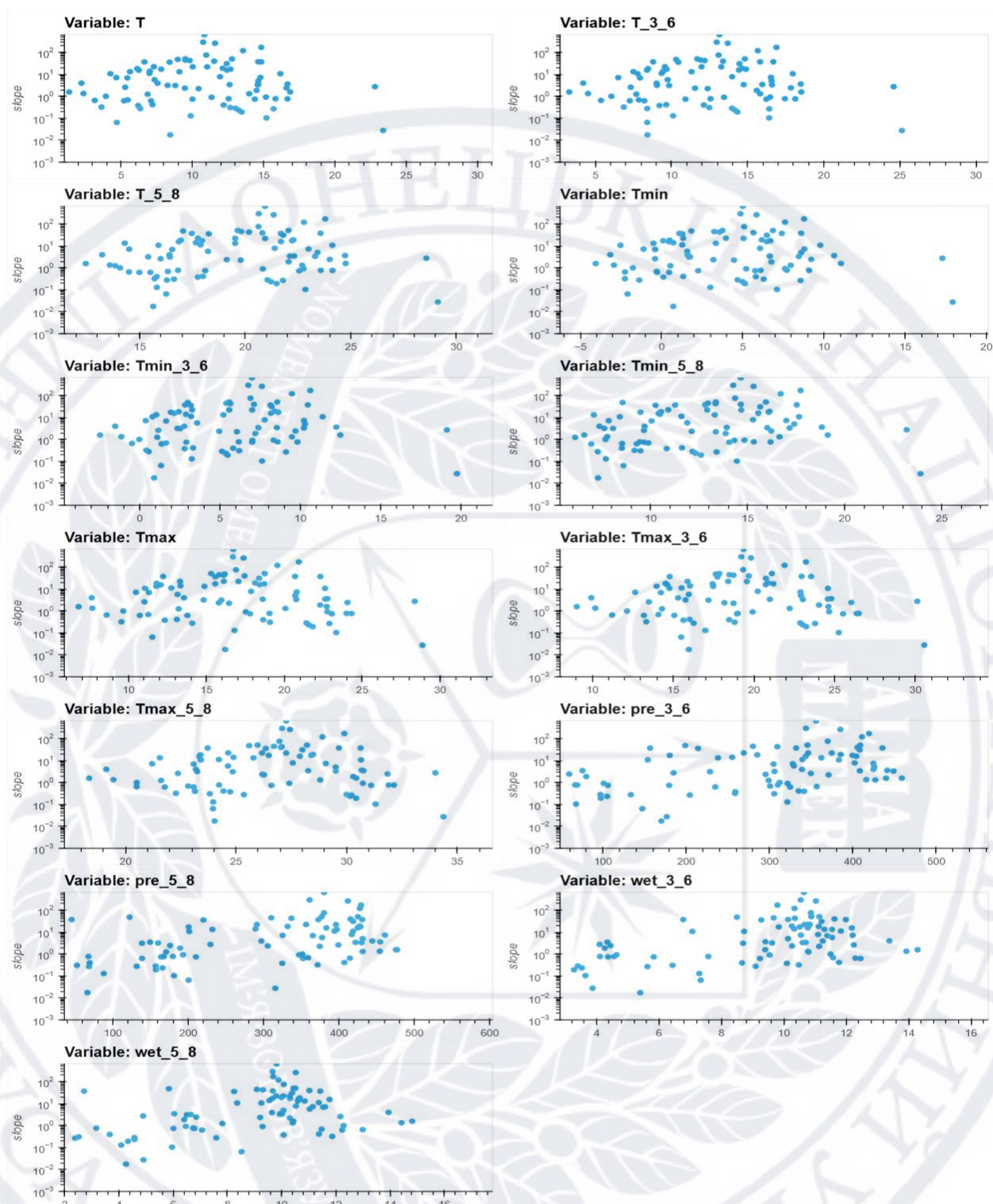


Рис. 3.24. Залежність коефіцієнта нахилу часового ряду рясності від видоспецифічного середньозваженого значення кліматичних показників (негативні тренди, модуль, логарифмічний масштаб по осі Y).

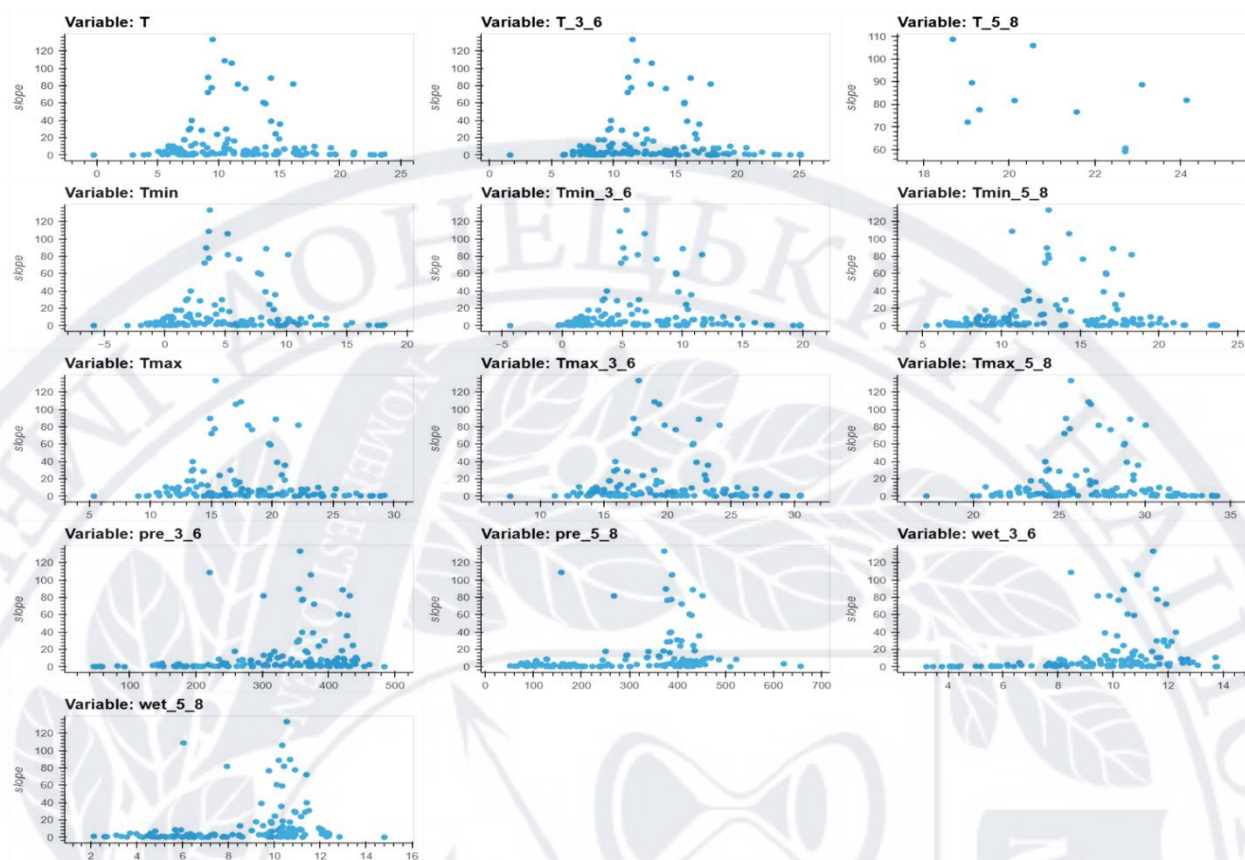


Рис. 3.25. Залежність коефіцієнта нахилу часового ряду рясності від видоспецифічного середньозваженого значення індексів вегетації (позитивні тренди, нормальний масштаб).

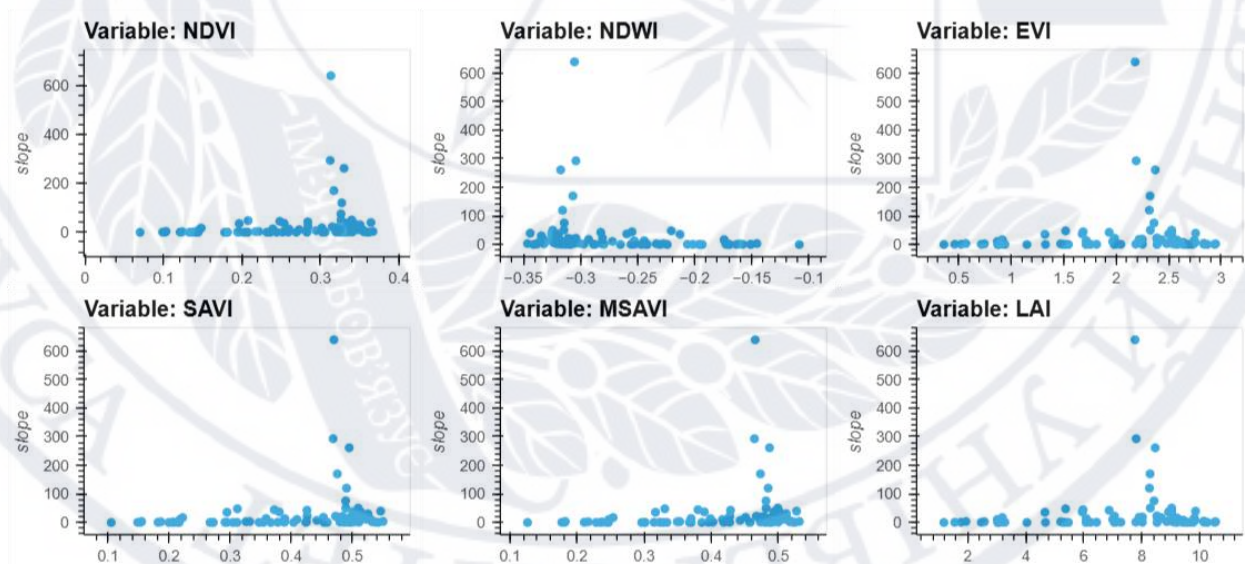


Рис. 3.26. Залежність коефіцієнта нахилу часового ряду рясності від видоспецифічного середньозваженого значення індексів вегетації (негативні тренди, модуль, нормальний масштаб).

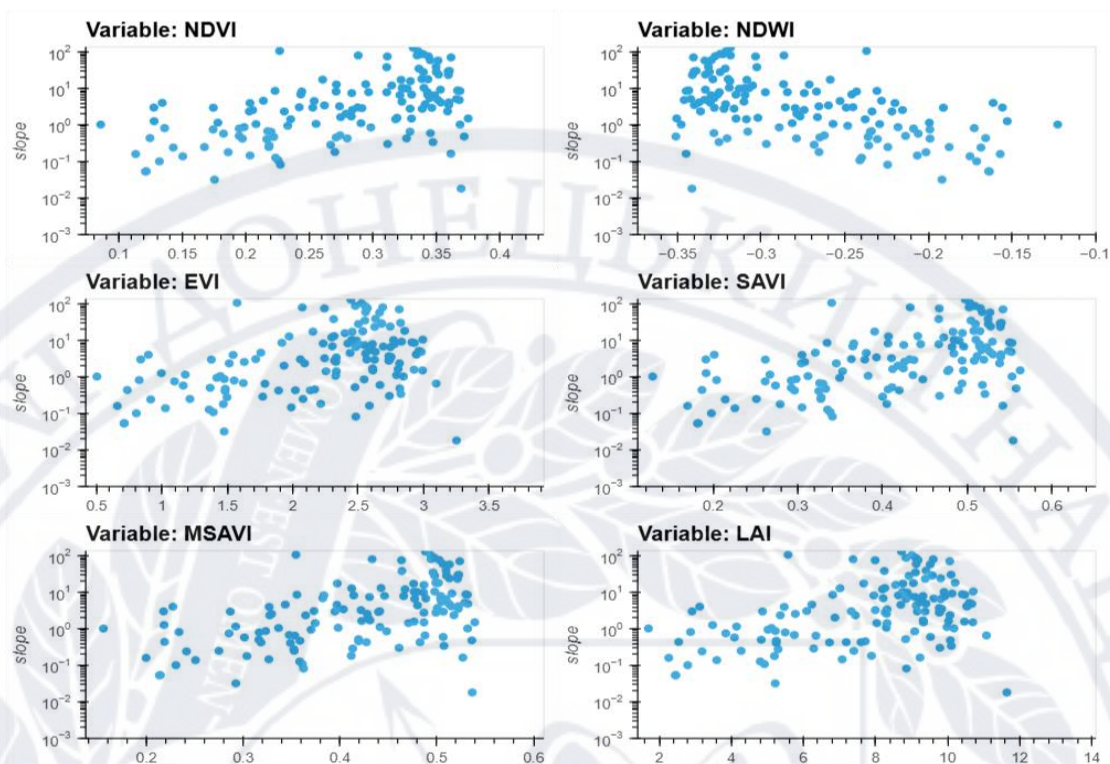


Рис. 3.27. Залежність коефіцієнта нахилу часового ряду рясності від видоспецифічного середньозваженого значення індексів вегетації (позитивні тренди, логарифмічний масштаб по осі Y).

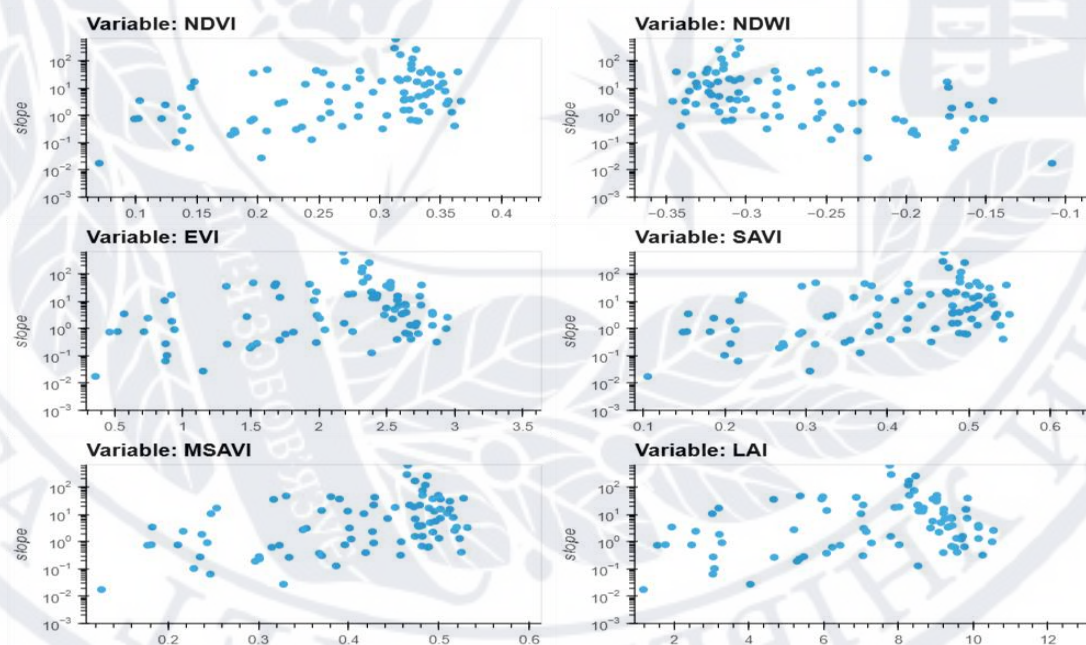


Рис. 3.28. Залежність коефіцієнта нахилу часового ряду рясності від видоспецифічного середньозваженого значення індексів вегетації (негативні тренди, модуль, логарифмічний масштаб по осі Y).

Гістограми розподілів (Рис. 3.19–3.20) показали, що для більшості кліматичних показників основна частина видів зосереджена в центральній частині діапазону. Розподіли характеризуються чіткими піками та відносно різким переходом до «хвостів». Розподіли для опадів (*pre_3_6*, *pre_5_8*) ближчі до рівномірного. Для індексів вегетації характерна виражена трипікова структура.

На діаграмах розсіювання (Рис. 3.21–3.28) чітко простежується зв'язок між положенням виду щодо його екологічного оптимуму та динамікою чисельності. У нормальному масштабі хмари точок для більшості кліматичних показників мають трикутну форму з максимальною щільністю в центральній частині. Для індексів вегетації трикутники асиметричні (вершина зміщена вправо, крім NDWI).

У логарифмічному масштабі по осі Y для негативних трендів спостерігається позитивна тенденція (форма «сигари»): види, що займають центральні (оптимальні) умови, демонструють менш виражене зниження чисельності. Для позитивних трендів індексів вегетації також проявляється позитивна лінійна залежність (крім NDWI).

Отримані патерни свідчать, що види птахів, які реалізують високу ярісність у найбільш типових (центральных) умовах клімату та рослинного покриву, характеризуються стабільнішою динамікою популяцій і менш різкими негативними трендами. Види, розташовані ближче до екологічних меж своїх ніш, частіше демонструють як сильне зростання, так і значне зниження чисельності. Це підтверджує важливість концепції центральності ніші та вказує, що зміни клімату та вегетації впливають на загальні тренди біорізноманіття нерівномірно — найсильніше через види, що знаходяться поблизу меж своїх екологічних оптимумів.

ВИСНОВКИ

1. Здійснено інтеграцію даних моніторингу гніздових птахів North American Breeding Bird Survey, кліматичних даних CRU TS та супутникових даних Landsat у єдину просторово узгоджену базу даних. Виконано просторове зіставлення 419 маршрутів BioTIME Dataset 195 з реальними траєкторіями маршрутів BBS (95,2 % від загальної кількості), що забезпечило можливість отримання характеристик рослинного покриву вздовж маршрутів моніторингу. Розраховано основні індекси рослинності (NDVI, EVI, SAVI, MSAVI, NDWI та LAI) у межах 800-метрових буферних коридорів маршрутів за даними Landsat Collection 2.

2. Аналіз довгострокової динаміки гамма-різноманіття гніздових птахів Північної Америки за період 1978–2007 років виявив протилежні тенденції основних показників біорізноманіття. Загальна чисельність птахів (N) демонструвала стійке зниження, тоді як видове багатство (S), індекс Шеннона (H), індекс рівномірності Піелу (J), обернений індекс Сімпсона ($1/D$) та індекс різноманітності Сімпсона ($1-D$) зростали. Отримані результати свідчать про істотну перебудову структури орнітологічних угруповань на континентальному рівні.

3. Дослідження часових змін екологічних факторів показало наявність довгострокових змін як кліматичних параметрів, так і характеристик рослинного покриву. Найбільш інформативними факторами виявилися температурні показники, особливо мінімальні температури повітря, а також індекси рослинності, що характеризують стан, густоту та вологість рослинного покриву.

4. Встановлено статистично значущі взаємозв'язки між показниками біорізноманіття, кліматичними чинниками та індексами рослинності на гамма-рівні. Найсильніші кореляції виявлено між показниками різноманіття та мінімальними температурами повітря. Показники видового різноманіття позитивно корелювали з підвищенням температурного фону, тоді як індекс домінування Сімпсона характеризувався негативними зв'язками. Виявлені кореляції підтверджують суттєвий внесок кліматичних змін і трансформації рослинного покриву у формування довгострокових тенденцій біорізноманіття птахів.

5. Аналіз трендів чисельності окремих видів показав, що спостережувані зміни гамма-різноманіття пов'язані насамперед зі зменшенням чисельності низки раніше домінуючих видів, зокрема *Passer domesticus*, *Agelaius phoeniceus*, *Quiscalus quiscula*, *Colinus virginianus* та інших. Зниження домінування цих видів супроводжувалося більш рівномірним розподілом особин між видами, що призвело до зростання індексів різноманіття попри

загальне зменшення чисельності птахів. Отримані результати свідчать про розвиток процесів біотичної гомогенізації орнітофауни Північної Америки.

6. Встановлено, що динаміка чисельності багатьох видів птахів тісно пов'язана зі змінами кліматичних умов та рослинного покриву. Найбільшу кількість сильних кореляцій виявлено з показниками мінімальної температури повітря та індексами рослинності NDVI, NDWI, SAVI і MSAVI. Найсильніші позитивні зв'язки з вегетаційними індексами характерні для видів відкритих та напіввідкритих ландшафтів. Це свідчить про важливу роль кліматичних змін і трансформації середовища існування у формуванні сучасної динаміки популяцій птахів.

7. Виявлено зв'язок між довгостроковою динамікою чисельності видів та їх положенням відносно екологічних оптимумів за кліматичними й вегетаційними характеристиками середовища. Види, що реалізують максимальну різноманітність у центральній частині градієнтів екологічних умов, характеризуються відносно стабільною динамікою популяцій. Натомість види, які перебувають поблизу меж своїх екологічних ніш, демонструють найбільші позитивні або негативні зміни чисельності. Це підтверджує важливу роль центральності екологічної ніші у визначенні реакції видів на довгострокові зміни клімату та рослинного покриву.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Burner R. C., Kirschbaum A., Hostetler J. et al. Location and land cover uncertainty associated with stop-level data from the North American Breeding Bird Survey (BBS). U.S. Geological Survey Data Release, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5066/P9J6QUF6>.
2. Dornelas M., Antão L. H., Moyes F., Bates A. E., Magurran A. E. et al. BioTIME: A database of biodiversity time series for the Anthropocene. *Global Ecology and Biogeography*. 2018. Vol. 27. P. 760–786. DOI: <https://doi.org/10.1111/geb.12729>.
3. Dornelas M., Antão L. H., Bates A. E. et al. BioTIME 2.0: Expanding and Improving a Database of Biodiversity Time Series. *Global Ecology and Biogeography*. 2025. Vol. 34, Issue 5. e70003. DOI: <https://doi.org/10.1111/geb.70003>.
4. Pardieck K. L., Ziolkowski D. J. Jr., Hudson M.-A. R. North American Breeding Bird Survey Dataset 1966–2014, version 2014.0. U.S. Geological Survey, Patuxent Wildlife Research Center, 2015. Available from: <https://www.pwrc.usgs.gov/BBS/RawData/>.
5. Ziolkowski D. J., Lutmerding M., Skalos S. M., English W. B., Hudson M.-A. R. 2025 Release - North American Breeding Bird Survey Dataset (1966–2024). U.S. Geological Survey Data Release, 2025. DOI: <https://doi.org/10.5066/P14SNUV4>.
6. Burner R. C., Kirschbaum A., Hostetler J. A., Ziolkowski D. J. Jr., Anich N. M., Turek D., Striegel E. D., Niemuth N. D. Informative priors can account for location uncertainty in stop-level analyses of the North American Breeding Bird Survey (BBS), allowing fine-scale ecological analyses. *Ornithological Applications*, 2024. Vol. 126. DOI: <https://doi.org/10.1093/ornithapp/duae041>.
7. Dornelas M., Antão L. H., Bates A. E. et al. BioTIME 2.0: Expanding and Improving a Database of Biodiversity Time Series. *Global Ecology and Biogeography*, 2025. Vol. 34, Issue 5. e70003. DOI: <https://doi.org/10.1111/geb.70003>.
8. Fairbairn A. J. et al. NDVI and vegetation volume as predictors of urban bird diversity. *Scientific Reports*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-96098-0>.
9. Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P. D., & Lister, D. H. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data*, 7, 109. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
10. Benedetti, Y., et al. (2023). EVI and NDVI as proxies for multifaceted avian diversity in urban areas. *Ecological Applications*, 33(3), e2808. <https://doi.org/10.1002/eap.2808>

11. Fairbairn, A. J., et al. (2025). NDVI and vegetation volume as predictors of urban bird diversity. Scientific Reports. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-96098-0>
12. Chen, L., et al. (2024). Heterogeneous and long-term effects of a changing climate on bird biodiversity. Global Environmental Change Advances, 2, 100008.
13. El Hindi, T. S., et al. (2023). Projected population- and season-dependent impacts of climate change on a migratory songbird in South America. Frontiers in Bird Science, 2, 1214458. <https://doi.org/10.3389/fbirs.2023.1214458>
14. Audubon Americas (2025). Climate Change Risk for Latin America's Threatened Forest Birds. National Audubon Society Report.
15. Leveau, L. M. (2024). Drivers of seasonal change of avian communities in urban parks and cemeteries of Latin America. Animals, 14(24), 3564.