

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТУСА

ЧЕРНЕНКО АНДРІЙ ОЛЕГОВИЧ

Допускається до захисту:

в.о. завідувача кафедри біофізики і фізіології

кандидат хім. наук, доцент

_____ О. І. Доценко

« _____ » _____ 2026 р.

**ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ МІСЬКИХ ТЕРИТОРІЙ ІЗ
ВИКОРИСТАННЯМ ПЛАТФОРМИ GOOGLE EARTH ENGINE**

Спеціальність 101 Екологія

Кваліфікаційна (бакалаврська) робота

Науковий керівник:

Міщенко А.М., к.б.н.,

старший викладач кафедри

біофізики та фізіології

Оцінка: ____ / ____ / ____

(бал/за шкалою ЄКТС/за національною шкалою)

Голова ЕК: _____

Вінниця 2026

АНОТАЦІЯ

Черненко А. О. Оцінка екологічного стану міських територій із використанням платформи Google Earth Engine. Спеціальність 101 «Екологія», Освітня програма «Екологія», Донецький національний університет імені Василя Стуса, Вінниця, 2026.

У кваліфікаційній роботі досліджено довгострокову просторово-часову динаміку міської рослинності Вінниці за 1990–2021 роки на основі індексу Kernel Normalized Difference Vegetation Index (KNDVI), розрахованого за даними супутникових знімків Landsat протягом вегетаційного сезону (травень–вересень). Розрахунок індексу, попереднє опрацювання супутникових даних та формування річних композитів виконано у середовищі Google Earth Engine із використанням Python API. Встановлено зростання частки статистично значущих трендів, а також зміну співвідношення напрямів трендів. Отримані результати свідчать про посилення процесів озеленення, просторово зосереджених переважно у лісопаркових, прибережних та периферійних зелених зонах міста. Результати можуть бути використані для екологічного моніторингу, планування зеленої інфраструктури та подальших досліджень взаємозв'язку між рослинністю, кліматичними чинниками й урбанізованим середовищем.

Ключові слова: KNDVI, спектральні індекси, Landsat, Google Earth Engine, міська рослинність, просторово-часовий аналіз, трендовий аналіз, Вінниця.

44 с., 13 рис., 26 джерел.

ABSTRACT

Chernenko A. O. Assessment of the Environmental Condition of Urban Areas Using the Google Earth Engine Platform. Specialty 101 “Ecology”, Educational program “Ecology”. Vasyl’ Stus Donetsk National University, Vinnytsia, 2026.

The bachelor thesis investigates long-term spatiotemporal dynamics of urban vegetation in Vinnytsia during 1990–2021 using the Kernel Normalized Difference Vegetation Index (KNDVI) derived from Landsat satellite imagery for the growing season (May–September). Satellite data preprocessing, annual compositing and index

calculations were implemented in Google Earth Engine using the Python API. The results indicate a pronounced greening pattern concentrated mainly in forested, riparian and peripheral green areas of the city. The workflow is reproducible and can be extended to other vegetation and urban indices for environmental monitoring and urban green infrastructure planning.

Keywords: KNDVI, NDVI, Landsat, Google Earth Engine, urban vegetation, spatiotemporal analysis, trend analysis, Vinnytsia.

44 p., 13 Fig., 26 Bibliography items.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	6
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ВИКОРИСТАННЯ ВЕГЕТАЦІЙНИХ ІНДЕКСІВ У ДОСЛІДЖЕННЯХ МІСЬКОЇ РОСЛИННОСТІ	10
1.1 Міська рослинність як об'єкт дистанційного моніторингу	10
1.2 Спектральні властивості рослинності та фізична основа індексного аналізу	11
1.3 NDVI: зміст, переваги та методичні обмеження.....	13
1.4 KNVDI як нелінійне узагальнення NDVI.....	14
1.5 Довгостроковий аналіз рослинності за даними Landsat і Google Earth Engine	16
1.6 Узагальнення огляду джерел і постановка дослідницької проблеми.....	17
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	18
2.1 Характеристика території дослідження	18
2.2 Вхідні супутникові дані та часові межі дослідження.....	18
2.3 Попереднє опрацювання даних у Google Earth Engine	20
2.4 Розрахунок NDVI та KNDVI.....	21
2.5 Піксельний аналіз трендів у Python.....	22
2.6 Обмеження методики та забезпечення відтворюваності	23
РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	24
3.1 Загальна динаміка медіанного KNDVI у 1990-2021 роках	24
3.2 Порівняння трендів у підперіодах 1990-2005 та 2005-2021 років	25
3.3 Просторова структура статистично значущих трендів	26
3.4 Розподіл значень нахилу тренду.....	27
3.5 Додатковий зональний аналіз часових рядів KNDVI.....	28
3.6 Порівняння KNDVI з іншими спектральними індексами	31
3.7 Екологічна інтерпретація отриманих результатів	35
3.8 Практичне значення результатів для міського екологічного моніторингу	35

ВИСНОВКИ.....	37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЛІТЕРАТУРИ.....	39
ДОДАТКИ.....	42
ДОДАТОК А.....	42



ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Скорочення/термін	Пояснення
GEE	Google Earth Engine – хмарна платформа для аналізу геопросторових даних і супутникових знімків.
KNDVI	Kernel Normalized Difference Vegetation Index – ядровий нормалізований різницевий вегетаційний індекс.
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index – нормалізований різницевий вегетаційний індекс.
NIR	Near Infrared – ближній інфрачервоний діапазон електромагнітного спектра.
RED	Червоний спектральний канал, у якому рослинні пігменти активно поглинають випромінювання.
SR	Surface Reflectance – поверхневе відбиття, атмосферно скориговані значення відбиття земної поверхні.
QA_PIXEL	Бітова маска якості пікселів у продуктах Landsat Collection 2 Level-2.
OLS	Ordinary Least Squares – метод найменших квадратів для оцінювання лінійної регресії.
β_1	Коефіцієнт нахилу лінійного тренду, що характеризує напрям і швидкість зміни KNDVI.
p-value	Імовірність отримати такий або більш екстремальний результат за умови істинності нульової гіпотези.
R^2	Коефіцієнт детермінації, що показує частку варіації залежної змінної, пояснену регресійною моделлю.
SLC-off	Артефакти у знімках Landsat 7 ETM+ після відмови Scan Line Corrector у травні 2003 року.

ВСТУП

Актуальність теми. Міська рослинність є одним із ключових природних компонентів урбанізованого середовища, оскільки вона впливає на мікроклімат, якість повітря, водний режим, біорізноманіття, рекреаційний потенціал території та загальний рівень екологічної безпеки міста. Для міст, що розвиваються в умовах кліматичних змін, зростання антропогенного навантаження та потреби у збалансованому просторовому плануванні, системний моніторинг стану зелених насаджень має як наукове, так і прикладне значення. Особливо важливим є не одноразове картографування зелених зон, а аналіз їхньої динаміки впродовж тривалого періоду, що дозволяє виявляти сталі тенденції, періоди погіршення або відновлення, а також просторові осередки позитивних і негативних змін.

Дистанційне зондування Землі на основі багатоспектральних супутникових даних дає можливість отримувати порівнювану інформацію про рослинність за великі часові проміжки. У цьому контексті особливу роль відіграє серія супутників Landsat, архів якої охоплює декілька десятиліть і забезпечує просторову деталізацію, достатню для міського рівня аналізу. Найпоширенішим індексом для оцінювання стану рослинності є NDVI, однак у щільних деревних насадженнях він може втрачати чутливість через ефект насичення, а в неоднорідному міському середовищі на його значення можуть впливати ґрунтовий фон, забудова, тінь та мозаїчність покриву. Тому перспективним є використання KNDVI – нелінійної ядрової модифікації NDVI, яка краще відображає відмінності у ділянках із високою рослинною щільністю та може бути корисною для аналізу міської зеленої інфраструктури.

Актуальність дослідження для міста Вінниці зумовлена поєднанням декількох чинників. По-перше, місто має розвинену систему парків, скверів, прибережних лісосмуг і зелених коридорів уздовж Південного Бугу. По-друге, просторовий розвиток міста та трансформація землекористування можуть впливати на стан рослинного покриву. По-третє, для прийняття управлінських і природоохоронних рішень важливо мати не лише опис наявних зелених зон, а й

кількісно обґрунтоване уявлення про те, як змінювалася їхня спектральна активність протягом тривалого часу.

Мета роботи – оцінити екологічний стан та довгострокову динаміку рослинного покриву міських територій м. Вінниця за даними дистанційного зондування Землі із використанням платформи Google Earth Engine та спектральних індексів рослинності.

Задачі роботи. В рамках мети були поставлені такі задачі:

1. Проаналізувати можливості використання супутникових даних Landsat та платформи Google Earth Engine для моніторингу екологічного стану міських територій.
2. Розробити відтворюваний алгоритм обробки супутникових даних у середовищі Google Earth Engine із використанням Python API для розрахунку спектральних індексів та формування часових рядів.
3. Сформувати часовий ряд індексу KNDVI для території м. Вінниця за період 1990–2021 років та дослідити його багаторічну динаміку.
4. Виконати попиксельний аналіз довгострокових трендів KNDVI та оцінити просторові особливості змін рослинного покриву в різні часові періоди.
5. Провести зональний аналіз динаміки KNDVI для різних типів міських територій (лісопаркових, паркових, прибережних, островних та периферійних ділянок) і визначити їхній внесок у загальноміські тенденції змін рослинності.
6. Порівняти поведінку KNDVI з іншими спектральними індексами (NDVI, EVI, MSAVI, NDWI, NDBI, BSI) та оцінити можливості їх використання для комплексної характеристики екологічного стану міського середовища.
7. Інтерпретувати виявлені просторово-часові закономірності змін рослинного покриву та оцінити їх значення для моніторингу й управління зеленою інфраструктурою міста.

Об'єкт дослідження – рослинний покрив міста Вінниця як компонент урбанізованого ландшафту, що відображається у багатоспектральних супутникових даних протягом вегетаційного сезону.

Предмет дослідження – просторово-часові закономірності зміни KNDVI у межах адміністративної території міста Вінниця за 1990–2021 роки та статистично значущі піксельні тренди цього індексу.

Методи дослідження. У роботі використано методи дистанційного зондування Землі, індексного аналізу рослинності, геоінформаційного опрацювання даних, хмарних обчислень у Google Earth Engine, статистичного аналізу часових рядів, піксельного лінійного регресійного аналізу, картографічної візуалізації та порівняльної інтерпретації результатів. Технічну частину дослідження реалізовано за допомогою Python API, Google Earth Engine та бібліотек NumPy, SciPy, Rasterio, Matplotlib і суміжних інструментів обробки растрових даних.

Наукова новизна роботи полягає у застосуванні KNDVI для довгострокового аналізу міської рослинності Вінниці за 32-річний період із поділом часової серії на два підперіоди, що дозволило виявити зміну характеру трендів від просторово неоднорідної динаміки до переважного озеленення у другій половині досліджуваного періоду.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих карт трендів і відтворюваного Python/GEE-підходу для екологічного моніторингу, аналізу стану зеленої інфраструктури, підготовки міських екологічних програм, обґрунтування заходів із збереження прибережних і лісопаркових зон, а також для подальших досліджень взаємозв'язку між рослинністю, тепловим режимом і просторовим розвитком міста.

Апробація результатів дослідження. На основі результатів роботи була опублікована стаття у віснику студентського наукового товариства ДонНУ імені Василя Стуса: Spatiotemporal dynamics of kNDVI in Vinnytsia city during the vegetation growing season: trend analysis for 1990–2021, ст. 199-203.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Міська рослинність як об'єкт дистанційного моніторингу

Міська рослинність охоплює різні типи зелених насаджень – парки, сквери, бульвари, прибережні зелені коридори, лісопаркові масиви, газони, насадження вздовж вулиць, дворові зелені зони та залишки природної або напівприродної рослинності в межах урбанізованої території. На відміну від великих природних екосистем, міський рослинний покрив є фрагментованим, просторово мозаїчним і тісно пов'язаним із забудовою, транспортною інфраструктурою, рекреаційним навантаженням та режимом догляду. Саме тому його оцінювання потребує методів, здатних охоплювати як загальноміський масштаб, так і локальні просторові відмінності.

У сучасних екологічних дослідженнях зелені насадження розглядають як складову зеленої інфраструктури міста. Вони виконують регулювальні, підтримувальні, культурні й забезпечувальні функції. Зокрема, дерева та інші насадження зменшують інтенсивність міського острова тепла, перехоплюють поверхневий стік, акумулюють вуглець, покращують якість повітря, формують середовища існування для різних видів і створюють умови для рекреації населення [14; 15]. У зв'язку з цим, зміни стану рослинності не можна розглядати лише як біофізичний процес, адже вони мають також планувальне, соціальне й управлінське значення.

Дистанційне зондування є особливо корисним для міського екологічного моніторингу, оскільки дозволяє регулярно отримувати інформацію про всю територію міста, включно з ділянками, які складно або довго обстежувати польовими методами. Супутникові дані забезпечують просторову безперервність спостережень, а архівні знімки дають змогу аналізувати не лише сучасний стан, а й історичні зміни. Для досліджень довгострокової динаміки важливою є порівнюваність даних у часі, тому особливе місце посідає серія Landsat, яка містить узгоджені спостереження з 1980-х років.

У міському середовищі використання супутникових індексів ускладнюється неоднорідністю земного покриття. У межах одного пікселя можуть одночасно бути представлені крони дерев, трава, ґрунт, асфальт, дахи будівель або тінь. Така мозаїчність спричиняє змішування спектрального сигналу. Тому результати індексного аналізу слід інтерпретувати обережно: індекси не є прямим виміром біомаси чи площі зелених насаджень, а відображають спектральну відповідь поверхні, пов'язану з фотосинтетично активною рослинністю.

Для Вінниці питання моніторингу зелених насаджень є важливим через наявність великої ролі прибережних ландшафтів Південного Бугу, лісопаркових зон, історично сформованої системи зелених насаджень і процесів просторового розвитку міста. Довгострокове спостереження за індексами рослинності дає змогу оцінити, чи відбувається загальне посилення зеленої складової, чи зміни мають локальний і суперечливий характер.

1.2 Спектральні властивості рослинності та фізична основа індексного аналізу

Вегетаційні індекси ґрунтуються на відмінностях у відбитті електромагнітного випромінювання різними типами поверхні. Здорова зелена рослинність активно поглинає випромінювання у червоній ділянці спектра, що пов'язано з поглинанням світла хлорофілом для фотосинтезу. Водночас у ближньому інфрачервоному діапазоні рослинність має високу відбивну здатність, зумовлену внутрішньою будовою листка. Саме контраст між низьким відбиттям у червоному каналі та високим відбиттям у NIR-каналі є основою більшості класичних індексів рослинності.

Найпростішим підходом є використання різниці між NIR і RED, однак абсолютна різниця може залежати від освітлення, атмосферних умов, сенсора, топографії та інших зовнішніх факторів. Тому для підвищення порівнюваності використовують нормалізовані співвідношення, які обмежують значення індексу певним діапазоном і частково зменшують вплив загальної яскравості сцени. Саме таким індексом є NDVI, запропонований у перших дослідженнях

супутникового моніторингу рослинності та згодом широко застосований в екології, аграрних дослідженнях, кліматології та географії [1; 2].

У межах міста спектральна відповідь рослинності часто накладається на сигнали штучних поверхонь. Асфальт, бетон, дахи, відкритий ґрунт і вода мають інші спектральні характеристики, але їхня присутність у змішаних пікселях може зменшувати або змінювати індексні значення. Крім того, тіні від будівель і дерев можуть знижувати відбиття в кількох каналах одночасно, ускладнюючи інтерпретацію. Тому у роботах із міською рослинністю важливо не тільки розрахувати індекс, а й правильно організувати сезонне композитування, маскування хмар і порівняння даних різних років.

Таблиця 1.1 Приклади індексів, дотичних до аналізу міського середовища

Індекс	Формула/зміст	Основне призначення	Обмеження
NDVI	$(NIR - RED) / (NIR + RED)$	Оцінювання зеленості, активності та щільності рослинності	Насичення у щільних насадженнях, чутливість до ґрунтового фону й змішаних пікселів
KNDVI	$\tanh(NDVI^2)$	Нелінійне посилення відмінностей у спектральній відповіді рослинності	Потребує обережної інтерпретації, оскільки є трансформацією спектрального сигналу, а не прямим виміром біомаси
EVI	Індекс із використанням NIR, RED і BLUE	Покращення чутливості у високобіомасних умовах	Потребує синього каналу та коректної атмосферної обробки
SAVI	NDVI з поправкою на ґрунтовий фон	Ділянки з розрідженою рослинністю	Потребує вибору параметра L
NDBI	$(SWIR - NIR) / (SWIR + NIR)$	Виділення забудованих територій	Може змішувати забудову з сухими відкритими ґрунтами

Розвиток вегетаційних індексів ішов у напрямі врахування додаткових факторів. Так, SAVI було запропоновано для зменшення впливу ґрунтового фону, EVI – для поліпшення чутливості в умовах високої біомаси та корекції

атмосферного впливу, NDWI – для оцінювання водного стану рослинності або водних об'єктів залежно від конкретної формули [4; 5; 26;]. Проте NDVI залишається базовим і найбільш інтерпретованим індексом, з яким порівнюють новіші підходи.

1.3 NDVI: зміст, переваги та методичні обмеження

NDVI є нормалізованою різницею між відбиттям у ближньому інфрачервоному та червоному спектральних каналах:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (1.1)$$

Значення NDVI теоретично перебувають у діапазоні від -1 до $+1$. Для активної зеленої рослинності зазвичай характерні додатні значення, тоді як вода, сніг, щільна забудова або відкриті поверхні можуть мати низькі або від'ємні значення. У практиці екологічного аналізу NDVI часто застосовується як відносний показник зеленості, щільності рослинного покриву, сезонної активності й фенологічних змін [3].

Сильними сторонами NDVI є простота розрахунку, інтерпретованість, сумісність із багатьма супутниковими сенсорами та велика кількість попередніх досліджень, що дозволяє порівнювати результати з іншими територіями. Саме завдяки цим перевагам NDVI став одним із найуживаніших індикаторів у дистанційному моніторингу рослинності. Він використовується для оцінювання продуктивності екосистем, реакції рослинності на кліматичні зміни, стану агроландшафтів, наслідків деградації земель та змін земного покриву.

Водночас NDVI має низку обмежень, які особливо важливі у міському контексті. Перше обмеження – насичення індексу за умов високої листової поверхні або щільної деревної рослинності. Коли рослинний покрив уже має високу щільність, подальше збільшення біомаси або зімкненості крон може слабо відображатися в NDVI. Друге обмеження – вплив ґрунтового фону й відкритих поверхонь, який особливо помітний для розрідженої рослинності. Третє обмеження – чутливість до атмосферних умов, тіней і різниць між сенсорами, якщо дані не були належним чином скориговані.

Для довгострокового аналізу NDVI важливо забезпечити порівнюваність річних значень. У цій роботі це досягається використанням продуктів Landsat Collection 2 Level-2, які містять атмосферно скориговане поверхнєве відбиття, а також застосуванням однакової сезонної рамки травень–вересень. Такий підхід зменшує ймовірність того, що виявлені тренди будуть зумовлені не змінами рослинності, а різним сезонним складом знімків або технічними відмінностями обробки.

1.4 KNDVI як нелінійне узагальнення NDVI

KNDVI, або Kernel Normalized Difference Vegetation Index, запропоновано як нелінійне узагальнення традиційного NDVI на основі ідей ядрових методів машинного навчання. У практичній операційній формі індекс може бути поданий як гіперболічний тангенс квадрата NDVI:

$$KNDVI = \tanh(NDVI^2) \quad (1.2)$$

Функція $\tanh$ обмежує значення індексу та забезпечує нелінійне перетворення, завдяки якому KNDVI може краще реагувати на відмінності у спектральній відповіді рослинності. Оскільки квадрат NDVI усуває знак і підсилює внесок більших за модулем значень, а $\tanh$ стабілізує результат, індекс набуває властивостей, корисних для аналізу рослинності з високою щільністю. У дослідженні Camps-Valls та співавторів KNDVI показано як індекс, здатний узагальнювати класичну логіку NDVI та підвищувати чутливість до біофізичних параметрів рослинності [6].

Головна відмінність між NDVI та KNDVI полягає не в наборі спектральних каналів, а у способі математичного перетворення сигналу. Обидва індекси використовують червоний і ближній інфрачервоний канали, але NDVI є лінійно-нормалізованим співвідношенням, тоді як KNDVI застосовує нелінійну функцію. Через це KNDVI може краще розрізняти зміни там, де NDVI наближається до насичення. Для міських територій це важливо передусім у лісопаркових масивах, прибережних лісосмугах і ділянках із високою зімкненістю крон.

Водночас KNDVI не слід тлумачити як універсальну заміну NDVI для всіх завдань. Він є похідним індексом, який змінює шкалу й чутливість аналізу. Якщо метою є порівняння з великою кількістю попередніх досліджень, NDVI залишається важливим орієнтиром. Якщо ж дослідження спрямоване на виявлення довгострокових змін у щільних або структурно неоднорідних зелених насадженнях, KNDVI може мати методичні переваги.

У цій роботі KNDVI використано як основний показник, оскільки Вінниця має значні площі деревної рослинності в межах прибережних і периферійних зелених зон. Саме для таких об'єктів обмеження NDVI, пов'язані з насиченням, можуть бути істотними. Водночас у методології збережено зв'язок із класичним NDVI: спершу розраховується нормалізована різниця за каналами NIR і RED, після чого застосовується ядрове перетворення.

Таблиця 1.2 Основні відмінності між NDVI та KNDVI

Критерії порівнювання	NDVI	KNDVI
Математична природа	Нормалізована різниця двох каналів	Нелінійне ядрове перетворення NDVI
Вхідні канали	NIR та RED	NIR та RED через попередній розрахунок NDVI
Діапазон значень	Від -1 до +1	Зазвичай від 0 до 1 в операційній формі $\tanh(\text{NDVI}^2)$
Чутливість у щільній рослинності	Може знижуватися через насичення	Вища порівняно з NDVI за рахунок нелінійної трансформації
Інтерпретація	Зеленість / фотосинтетична активність	Нелінійно трансформована зеленість, чутливіша до високих значень рослинності
Переваги для міського аналізу	Простота, порівнюваність, велика кількість досліджень	Краще виділення відмінностей у лісопаркових і прибережних зелених зонах

1.5 Довгостроковий аналіз рослинності за даними Landsat і Google Earth Engine

Довгострокові часові ряди супутникових даних є основою для виявлення трендів рослинності. У цьому контексті архів Landsat має особливе значення, оскільки поєднує багаторічну безперервність, глобальне покриття та просторову роздільну здатність 30 м для основних спектральних каналів. Для міського аналізу така роздільність не дозволяє детально оцінити окреме дерево, але є достатньою для аналізу парків, лісосмуг, прибережних зон, великих дворів і масивів зелених насаджень.

Перехід від окремих знімків до довгострокових рядів потребує врахування сенсорних змін. У період 1990–2021 років для території Вінниці доцільно використовувати Landsat 4 TM, Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ та Landsat 8 OLI. Кожен із цих сенсорів має власні особливості, однак продукти Collection 2 Level-2 забезпечують атмосферно скориговані дані поверхневого відбиття, придатні для міжрічного порівняння. Особливу увагу потрібно приділяти Landsat 7 ETM+ після 2003 року, коли відмова Scan Line Corrector призвела до характерних смугових прогалин у знімках.

Google Earth Engine суттєво змінив практику роботи з великими супутниковими архівами. Платформа забезпечує доступ до підготовлених колекцій даних, хмарну обробку, фільтрацію знімків, застосування масок якості, створення композитів та експорт результатів без необхідності локально завантажувати всі сцени [7]. Для бакалаврського дослідження це має важливе методичне значення, адже робочий процес стає відтворюваним, масштабованим і прозорим, оскільки всі ключові етапи можна зафіксувати у коді.

Використання Python API для Google Earth Engine дозволяє поєднати хмарну обробку з локальним статистичним аналізом. У межах такої схеми у GEE доцільно виконувати операції, що потребують доступу до великої кількості супутникових сцен, а саме: фільтрацію за датами, межами території, хмарністю, маскування пікселів і композитування. Після експорту річних растрових шарів

локальний Python використовується для гнучкого статистичного аналізу, побудови карт трендів, обчислення p -value, R^2 та підготовки графіків.

1.6 Узагальнення огляду джерел і постановка дослідницької проблеми

Огляд літератури засвідчує, що NDVI є фундаментальним індексом для моніторингу рослинності, проте його обмеження у щільних насадженнях і мозаїчному міському середовищі стимулюють пошук альтернативних або доповнювальних показників. KNDVI є одним із нових підходів, який зберігає фізичну логіку класичного індексу, але змінює математичну форму для підвищення чутливості. Для досліджень міської зеленої інфраструктури це відкриває можливість точніше аналізувати зміни в ділянках із високою зімкненістю крон, де класичний NDVI може демонструвати слабку диференціацію.

У світовій літературі широко представлені дослідження NDVI-трендів на регіональному, національному та глобальному рівнях, а також роботи, присвячені моніторингу міських зелених просторів. Водночас довгострокові дослідження міської рослинності в українських містах із застосуванням KNDVI залишаються обмеженими. Це формує наукову нішу для роботи, спрямованої на оцінювання 32-річної динаміки рослинності у Вінниці.

Дослідницька проблема цієї роботи полягає у необхідності кількісно визначити, як змінювався спектральний стан рослинності Вінниці в межах вегетаційного сезону за період 1990–2021 років, чи відбувалися зміни рівномірно в просторі, і чи можна виявити структурний зсув між раннім та пізнім етапами часової серії. Відповіддю на цю проблему є поєднання KNDVI, довгострокових даних Landsat, хмарного обчислення в GEE та піксельного статистичного аналізу у Python.

РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Характеристика території дослідження

Територією дослідження є місто Вінниця, розташоване у центральній частині України в межах лісостепової природної зони. Орієнтовні географічні координати центральної частини міста становлять $49,23^{\circ}$ пн. ш. та $28,47^{\circ}$ сх. д. Адміністративна площа міста у дослідженні прийнята близько 130 км^2 відповідно до використаної межі аналізу. Вінниця сформована як середнє за розмірами місто з поєднанням щільної забудови, промислових територій, житлових районів, садибної забудови, парків, скверів, прибережних ландшафтів і периферійних зелених масивів.

Важливою природною особливістю міста є річка Південний Буг, яка формує прибережні зелені коридори та впливає на просторову організацію рослинності. Уздовж річки та її приток зосереджені ділянки деревної рослинності, рекреаційні території та фрагменти напівприродних ландшафтів. Крім того, на периферії міста та в суміжних зонах розташовані лісові й лісопаркові масиви, які мають високі значення вегетаційних індексів і можуть суттєво впливати на загальноміську медіану KNDVI.

Кліматичні умови Вінниці відповідають помірно континентальному типу з вираженою сезонністю. Для аналізу рослинності обрано період травень–вересень, який охоплює основну частину вегетаційного сезону: весняне наростання зеленої маси, літній максимум фотосинтетичної активності та ранні прояви осіннього зниження активності рослин. Такий часовий інтервал дозволяє уникнути значної частини весняних перехідних умов, пов'язаних із залишковим снігом або недостатнім розвитком листя, і водночас врахувати кінець активного сезону.

2.2 Вхідні супутникові дані та часові межі дослідження

Вхідною інформаційною основою роботи є супутникові дані Landsat Collection 2 Level-2 Surface Reflectance. Ці продукти містять атмосферно

скориговане поверхневе відбиття, що є необхідною умовою для порівняння індексів рослинності у різні роки. На відміну від сирих або лише радіометрично відкаліброваних зображень, поверхневе відбиття краще відображає властивості земної поверхні, оскільки вплив атмосфери вже частково враховано під час попередньої обробки [8; 9; 10].

Період дослідження охоплює 1990–2021 роки. Така тривалість дає змогу аналізувати не короткочасні сезонні коливання, а довгострокові тенденції, пов’язані з розвитком міста, змінами земного покриву, кліматичною мінливістю та процесами дозрівання зелених насаджень. Для кожного року використовувалися знімки, отримані протягом травня–вересня. Надалі з них формувався річний композит, який представляє узагальнений стан рослинності за відповідний вегетаційний сезон.

Для забезпечення радіометричної послідовності між сенсорами було застосовано логіку, за якою різні супутники використовуються у відповідних частинах часової серії. У ранній період було використано Landsat 4 TM і Landsat 5 TM, далі – комбінацію Landsat 5 TM та Landsat 7 ETM+ до відмови SLC, після 2003 року – переважно Landsat 5 TM, а з 2013 року – Landsat 8 OLI. Такий підхід зменшує ризик внесення у часовий ряд артефактів, не пов’язаних із реальною динамікою рослинності.

Таблиця 2.1 Сенсорна основа часової серії Landsat для 1990-2021 років

Період	Сенсори/джерела даних	Методичне пояснення
1990-1998	Landsat 4 TM, Landsat 5 TM	Використання доступних TM-знімків для ранньої частини часового ряду
1999-2002	Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+	Комбінування даних до відмови Scan Line Corrector у Landsat 7
2003-2012	Landsat 5 TM	Уникнення SLC-off артефактів у Landsat 7 ETM+ після травня 2003 року
2013-2021	Landsat 8 OLI	Використання сучасного сенсора OLI з продуктами Collection 2 Level-2

2.3 Попереднє опрацювання даних у Google Earth Engine

Попереднє опрацювання супутникових даних виконано у Google Earth Engine із використанням Python API. Основні операції включали завантаження відповідних колекцій Landsat, фільтрацію за межами території дослідження, фільтрацію за датами в межах вегетаційного сезону, первинне обмеження за сценічною хмарністю, застосування піксельної маски якості та формування річних композитів.

Для маскування хмар і хмарних тіней використано бітову маску QA_PIXEL. У продуктах Landsat Collection 2 біт 3 відповідає хмарі, а біт 4 – хмарній тіні. Пікселі, для яких ці біти мали значення, що вказують на наявність хмари або тіні, виключалися з подальшого аналізу. Такий підхід важливий, оскільки хмари та тіні можуть суттєво спотворювати значення спектральних індексів, особливо у часових рядах, де навіть окремі аномальні пікселі можуть впливати на оцінювання тренду.

Таблиця 2.2 Основні етапи попереднього опрацювання супутникових даних

Етап	Зміст операції	Причина застосування
Фільтрація за датою	Вибір знімків травень–вересень кожного року	Порівняння однакових фенологічних умов
Фільтрація за територією	Обмеження колекції межами Вінниці та буфером обробки	Зменшення обсягу даних і фокус на території дослідження
Фільтрація за хмарністю	Виключення сцен із надмірною хмарністю	Попереднє підвищення якості вибірки
QA_PIXEL mask	Маскування хмар і тіней за бітами 3 та 4	Усунення пікселів із викривленими спектральними значеннями
Медіанне композитування	Розрахунок медіани по валідних спостереженнях	Стійкість до залишкових аномалій
Експорт	Вивантаження річних KNDVI-растерів	Подальший локальний статистичний аналіз у Python

Після маскування для кожного року формувалася медіанний композит. Медіана обрана як стійка статистика, менш чутлива до залишкових аномальних значень, ніж середнє. Якщо окремі пікселі містять не повністю замасковані

хмари, тіні або інші нетипові відбиття, медіана зменшує їхній вплив на річне значення. Кількість валідних безхмарних спостережень у річних композитах варіювала від 5 до 18 залежно від року та доступності знімків.

2.4 Розрахунок NDVI та KNDVI

Розрахунок KNDVI здійснювався у два кроки. Спочатку для кожного валідного пікселя розраховувався NDVI за стандартною формулою (1.1), де NIR і RED відповідають спектральним каналам ближнього інфрачервоного та червоного діапазонів конкретного сенсора Landsat. Далі до отриманого NDVI застосовувалася нелінійна трансформація $\tanh(\text{NDVI}^2)$, що формувала KNDVI.

Для Landsat 4/5 TM та Landsat 7 ETM+ червоний канал відповідає Band 3, а NIR – Band 4. Для Landsat 8 OLI червоним є Band 4, а NIR – Band 5. У продуктах Collection 2 Level-2 ці канали подані як SR_B3, SR_B4, SR_B5 тощо, із відповідними коефіцієнтами масштабування. У межах GEE масштабування та приведення каналів до порівнюваної форми є критично важливими, оскільки індекси мають розраховуватися на основі фізично змістовних значень відбиття, а не необроблених цифрових чисел.

Таблиця 2.3 Канали Landsat, використані для розрахунку NDVI та KNDVI

Сенсор	Червоний канал	NIR-канал	Примітка
Landsat 4/5 TM	SR_B3	SR_B4	Канали класичної TM-схеми
Landsat 7 ETM+	SR_B3	SR_B4	Використовувався до SLC-off у часовому ряді
Landsat 8 OLI	SR_B4	SR_B5	Інша нумерація каналів порівняно з TM/ETM+

Оскільки KNDVI є похідним від NDVI, усі помилки, пов'язані з некоректним вибором каналів, неврахуванням масштабування або недостатнім маскуванню хмар, автоматично впливають і на KNDVI. Саме тому методична частина роботи приділяє увагу не лише формулі індексу, а й усьому ланцюгу попередньої обробки даних.

2.5 Піксельний аналіз трендів у Python

Після експорту річних KNDVI-композитів із Google Earth Engine подальший аналіз виконувався локально у Python. Такий поділ робочого процесу є доцільним, оскільки GEE ефективно працює з великими супутниковими колекціями, а Python надає гнучкі засоби для статистичного аналізу растрових часових рядів, формування вихідних карт і графіків.

Для оцінювання трендів використано звичайну лінійну регресію методом найменших квадратів. Для кожного пікселя незалежно будувалася модель залежності KNDVI від року:

$$KNDVI(t) = \beta_0 + \beta_1 \cdot t + \varepsilon \quad (2.1)$$

де t – календарний рік; β_0 – вільний член регресії; β_1 – коефіцієнт нахилу, який показує середню зміну KNDVI за один рік; ε – залишкова похибка. Додатне значення β_1 інтерпретується як тенденція до зростання KNDVI, тобто умовне «озеленення», а від’ємне – як тенденція до зменшення KNDVI, або «побуріння».

Статистична значущість коефіцієнта нахилу перевірялася за допомогою двостороннього t-тесту для нульової гіпотези $H_0: \beta_1 = 0$. Порогове значення статистичної значущості приймалося на рівні $p < 0,05$. Окремо розраховувався коефіцієнт детермінації R^2 , який показує, наскільки добре лінійна модель описує часову зміну KNDVI у конкретному пікселі.

Трендовий аналіз проводився окремо для двох підперіодів: 1990–2005 та 2005–2021 роки. Такий поділ дозволяє не лише оцінити загальну тенденцію, а й виявити можливий структурний зсув у динаміці рослинності. Вибір межі 2005 року пов’язаний із характером часової серії. Після 2005 року спостерігається період знижених значень, а після 2012 року – відновлення та зростання KNDVI. Тому другий підперіод відображає не тільки продовження попередньої тенденції, а й фазу виразної зміни режиму.

Пікселі класифікувалися за напрямом і значущістю тренду. Значущі додатні тренди відносилися до категорії *greening*, значущі від’ємні – до категорії *browning*. Окремо виділялися стабільні пікселі з дуже малим абсолютним

значенням нахилу. Такий підхід дає змогу поєднати статистичну строгість і картографічну інтерпретованість результатів.

Таблиця 2.4 Інтерпретація статистичних показників трендового аналізу

Показник	Зміст	Інтерпретація
$\beta_1 > 0, p < 0,05$	Статистично значущий додатний нахил	Зростання KNDVI / озеленення
$\beta_1 < 0, p < 0,05$	Статистично значущий від'ємний нахил	Зниження KNDVI / побуріння
$p \geq 0,05$	Тренд статистично не підтверджено	Зміни можуть бути випадковими або слабкими
$ \beta_1 \leq 10^{-3}$	Малий нахил	Умовно стабільна динаміка
R^2	Якість пояснення варіації лінійною моделлю	Вищі значення свідчать про кращу відповідність трендовій моделі

2.6 Обмеження методики та забезпечення відтворюваності

Методика має низку обмежень, які необхідно враховувати під час інтерпретації результатів. По-перше, просторове розрізнення Landsat 30 м означає, що один піксель часто є змішаним і може містити різні типи поверхні. Отже, KNDVI відображає інтегральний спектральний сигнал пікселя, а не точну площу дерев чи трав'яного покриву. По-друге, медіанне композитування згладжує сезонну динаміку, тому результати характеризують узагальнений стан вегетаційного сезону, а не окремі фенологічні фази. По-третє, лінійна регресія описує загальний напрям зміни, але не відображає складні нелінійні траєкторії.

Окремим джерелом невизначеності є різниця між сенсорами Landsat. Хоча продукти Collection 2 Level-2 забезпечують високий рівень узгодженості, абсолютна ідентичність спектральних характеристик різних сенсорів неможлива. Тому приділено увагу періодизації сенсорів і уникненню використання Landsat 7 ETM+ після виникнення SLC-off артефактів.

Перевагою є відтворюваність. Основні операції – від фільтрації знімків до розрахунку індексу та статистики реалізовані у коді. Це означає, що методику можна перевірити, повторити для іншої території або розширити за рахунок додаткових індексів, наприклад EVI, SAVI, NDBI, NDWI чи температури поверхні.

РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Загальна динаміка медіанного KNDVI у 1990–2021 роках

Аналіз часової серії загальноміського медіанного KNDVI показав, що динаміка рослинності Вінниці протягом 1990–2021 років не є рівномірною. У ній можна умовно виділити кілька фаз, які відображають як міжрічні коливання, так і більш тривалі зміни. Перший період, приблизно 1990–2000 роки, характеризується відносно стабільними, але осциляційними значеннями без чітко вираженого односпрямованого тренду. Другий етап, 2000–2004 роки, демонструє підвищені, але також відносно стабільні значення KNDVI. Третій етап, 2005–2011 роки, вирізняється зниженням показника, коли річні значення залишаються нижчими за довгостроковий середній рівень. Починаючи приблизно з 2012 року, простежується фаза відновлення і зростання, що завершується найвищим значенням медіанного KNDVI у 2021 році – близько 0,367.

Така структура часової серії важлива для розуміння результатів регресійного аналізу. Якщо перший підперіод охоплює переважно фазу коливань і помірного зростання, то другий підперіод включає як спад 2005–2011 років, так і подальше виразне відновлення. Через це лінійний тренд у 2005–2021 роках стає більш помітним, а просторовий розподіл значущих позитивних трендів – щільнішим.

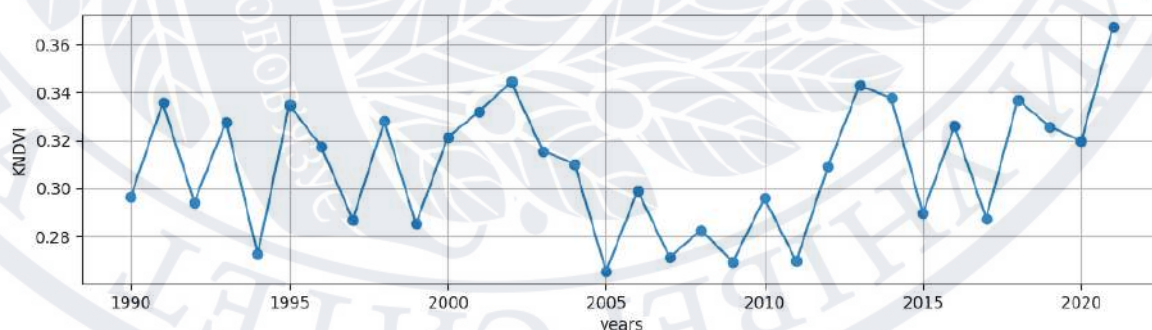


Рис. 3.1. Динаміка медіанного KNDVI у межах міста Вінниці протягом вегетаційного сезону, 1990–2021 роки

На Рис. 3.1 видно, що найнижчі значення у часовій серії припадають на середину 2000-х і кінець 2000-х років, тоді як після 2012 року спостерігається переважно вищий рівень індексу. Водночас окремі роки мають помітні коливання, що може бути пов'язано з погодними умовами конкретного сезону, відмінностями у складі доступних безхмарних знімків, локальними змінами земного покриву або поєднанням цих факторів. Саме тому інтерпретація базується не на окремих роках, а на загальній структурі часової серії та статистично значущих піксельних трендах.

3.2 Порівняння трендів у підперіодах 1990-2005 та 2005-2021 років

Піксельний регресійний аналіз показав істотну різницю між двома підперіодами. У 1990–2005 роках частка пікселів зі статистично значущими трендами становила 30,41 %. У 2005–2021 роках цей показник зріс до 59,64 %, тобто майже вдвічі. Це означає, що у другому підперіоді зміни KNDVI були не лише сильнішими за напрямом, а й більш просторово поширеними.

Таблиця 3.1 Узагальнення піксельної статистики лінійних трендів KNDVI

Період	Пікселі з $p < 0,05$	Кількість значущих пікселів	Від'ємні тренди, %	Додатні тренди, %
1990-2005	30,41%	59 381	33,43	66,57
2005-2021	59,64%	116 443	11,70	88,3

У першому підперіоді співвідношення значущих трендів було змішаним: приблизно третина значущих пікселів демонструвала від'ємний тренд, а дві третини – додатний. Це свідчить про просторово неоднорідну динаміку рослинності, коли окремі ділянки могли втрачати спектральну зеленість, тоді як інші – її нарощували. У другому підперіоді картина суттєво змінюється: частка додатних трендів серед статистично значущих пікселів досягає 88,30 %, тоді як від'ємні тренди становлять лише 11,70 %.

Отже, головним результатом є зміна домінуючого режиму динаміки. Якщо у 1990–2005 роках міська рослинність демонструвала мішаний характер змін, то у 2005–2021 роках переважним процесом стало зростання KNDVI. Це може бути

пов'язано з дозріванням деревних насаджень, відновленням після періоду знижених значень, змінами режиму догляду за зеленими зонами, кліматичними умовами або комбінацією цих чинників.

3.3 Просторова структура статистично значущих трендів

Картографічний аналіз статистично значущих трендів показав, що у 1990–2005 роках (Рис. 3.2) вони розміщені відносно розріджено та мозаїчно. Додатні й від'ємні тренди співіснують у різних частинах міста, що узгоджується зі змішаним характером статистичних результатів. У 2005–2021 роках (Рис. 3.3) щільність значущих пікселів істотно зростає, а позитивні тренди стають переважаючими. Вони концентруються передусім у зелених масивах, прибережних зонах, лісопаркових територіях і периферійних ділянках.



Рис. 3.2. Просторовий розподіл статистично значущих трендів KNDVI у 1990–2005 роках



Рис. 3.3. Просторовий розподіл статистично значущих трендів KNDVI у 2005–2021 роках

Просторова концентрація позитивних трендів у лісопаркових і прибережних зонах свідчить, що зростання KNDVI, ймовірно, пов'язане не стільки з появою нових зелених площ у щільно забудованій частині міста, скільки з підвищенням спектральної активності вже наявної зеленої інфраструктури. Для деревних насаджень це може відображати зростання крон, підвищення зімкненості або відновлення після періодів стресу. У межах міста такі зміни мають важливе екологічне значення, оскільки саме зрілі деревні насадження забезпечують значну частину регулювальних екосистемних послуг.

Водночас ділянки з від'ємними трендами потребують окремої уваги. Вони можуть бути пов'язані з локальною забудовою, реконструкцією територій, вирубуванням або деградацією насаджень, зміною режиму використання земель, а також із природними або кліматичними стресами. Оскільки аналіз проведено за супутниковим індексом, такі ділянки доцільно додатково перевіряти за історичними знімками високої роздільності, містобудівною документацією або польовими даними.

3.4 Розподіл значень нахилу тренду

Гістограми значущих значень нахилу тренду показують, що в обох підперіодах розподіли мають двомодальний характер із концентрацією значень навколо від'ємних і додатних піків. Однак співвідношення цих піків суттєво відрізняється. У 1990–2005 роках (Рис. 3.4) додатний пік переважає над від'ємним, але від'ємна складова залишається помітною. У 2005–2021 роках (Рис. 3.5) додатний пік стає значно виразнішим, тоді як від'ємний – зменшується.

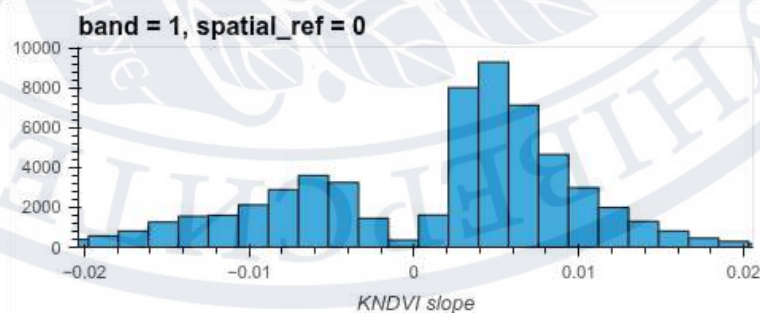


Рис. 3.4. Розподіл значень нахилу KNDVI для статистично значущих пікселів у 1990-2005 роках

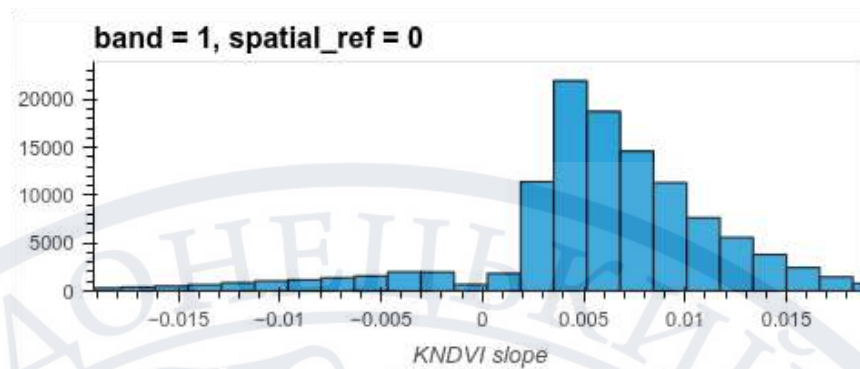


Рис. 3.5. Розподіл значень нахилу KNDVI для статистично значущих пікселів у 2005-2021 роках

Діапазон значень нахилу в обох підперіодах становить приблизно від $-0,02$ до $+0,02$ KNDVI за рік. Це свідчить, що найбільш інтенсивні зміни мають локальний характер, тоді як більшість пікселів концентрується у відносно вузькому діапазоні помірних трендів. Для інтерпретації важливо, що додатні тренди у другому підперіоді не лише чисельно переважають, а й формують щільніший розподіл, що відповідає картографічній картині просторово поширеного озеленення.

Гістограми доповнюють карту трендів, оскільки дають змогу оцінити не лише напрям, а й інтенсивність змін. Якщо карта показує, де саме відбувалися статистично значущі зміни, то розподіл нахилів показує, наскільки сильними були ці зміни в сукупності пікселів. Поєднання цих двох типів результатів підвищує надійність інтерпретації.

3.5 Додатковий зональний аналіз часових рядів KNDVI

Для поглиблення інтерпретації загальноміських результатів було проведено додатковий зональний аналіз окремих ділянок Вінниці. Необхідність такого підходу зумовлена тим, що усереднений показник KNDVI для всієї території міста відображає інтегральний стан дуже різноманітного міського простору. У межах адміністративної території Вінниці поєднуються щільно забудовані квартали, транспортна інфраструктура, промислові території, паркові масиви, прибережні зелені зони, відкриті ґрунти та аграрні ділянки. Унаслідок цього

загальноміський часовий ряд може згладжувати або частково приховувати локальні особливості динаміки рослинного покриву.

З цією метою було виділено тестові ділянки, які репрезентують різні типи міського та приміського рослинного покриву: великі лісопаркові масиви, міські парки, прибережні зелені території, островні зелені ділянки та відкриті аграрні території на периферії міста. До аналізу включено Лісопарк, парк імені М. Леонтовича, острів Кемпа, дві ділянки поблизу Вишенського озера, а також північну, південну і відкриту польову/аграрну частини Вінниці. Окремо використовувався загальноміський ряд KNDVI для всієї території Вінниці як інтегральний контрольний показник.



Рис. 3.6. Аналіз окремих ділянок території міста Вінниці

Такий поділ дає змогу порівняти часову поведінку KNDVI у стабільних зелених масивах, рекреаційних територіях, прибережних зонах та відкритих сільськогосподарських або перелогових ділянках. Це важливо, оскільки один і той самий загальноміський тренд може формуватися різними процесами: зростанням щільності деревного покриву в парках, відновленням рослинності на відкритих територіях, сезонними коливаннями аграрних культур або змінами у забудованих зонах.

Таблиця 3.2 Ділянки, використані для додаткового зонального аналізу KNDVI

№	Ділянка	Клас	Тип території
1	м. Вінниця (загалом)	MIX	Змішана міська територія
2	Лісопарк	FOR	Лісопаркова/деревна рослинність
3	Парк ім. Леонтовича	PRK	Паркова рекреаційна територія
4	Острів Кемпа	PRK	Паркова територія з прибережним впливом
5	Ділянка біля Вишенського озера 1	PRK	Парково-рекреаційна прибережна зона
6	Ділянка біля Вишенського озера 2	FOR-FIL	Лісопольова/змішана зелена територія
7	Поля та ділянки на півночі Вінниці	FOR-FIL	Периферійна зелена/лісопольова територія
8	Поля та ділянки на півдні Вінниці	FOR-FIL	Периферійна зелена/лісопольова територія
9	Поля та ділянки на сході Вінниці	FIL	Відкриті/аграрні ділянки

Порівняння часових рядів показує, що значення KNDVI у вибраних ділянках мають різні рівні та амплітуди коливань. Лісопарк і частина прибережних територій мають відносно високі значення індексу, що відповідає більшій частці деревної та трав'яної рослинності. Натомість відкриті та аграрні ділянки демонструють мінливішу динаміку, оскільки їхній спектральний сигнал залежить не лише від стану рослинності, а й від сільськогосподарського використання, фази обробітку ґрунту, зміни культур, строків вегетації та наявності відкритого ґрунту.

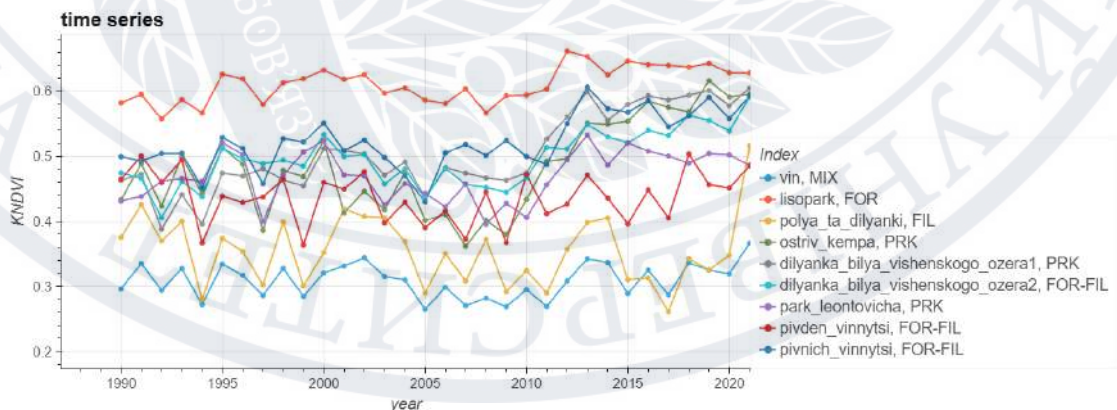


Рис. 3.7. Порівняння часових рядів індексу KNDVI на окремих ділянках протягом 1990-2021 років

Таблиця 3.3 Значення KNDVI для окремих ділянок у різні роки

Ділянка	1990	2005	2011	2012	2021
м. Вінниця (загалом)	0.296	0.265	0.269	0.308	0.366
Лісопарк	0.582	0.587	0.603	0.662	0.628
Парк ім. Леонтовича	0.432	0.443	0.456	0.495	0.486
Острів Кемпа	0.433	0.401	0.492	0.497	0.595
Ділянка біля Вишенського озера 1	0.463	0.436	0.527	0.561	0.605
Ділянка біля Вишенського озера 2	0.474	0.436	0.514	0.511	0.591
Поля та ділянки на півночі Вінниці	0.500	0.430	0.488	0.550	0.592
Поля та ділянки на півдні Вінниці	0.465	0.390	0.412	0.427	0.486
Поля та ділянки на сході Вінниці	0.375	0.290	0.290	0.357	0.516

За вибраними роками видно, що у 2021 році більшість ділянок має вищі значення KNDVI, ніж у період знижених значень 2005–2011 років. Особливо помітне підвищення характерне для ділянок біля Вишенського озера, острова Кемпа та північної частини Вінниці. Для загальноміського показника це підтверджує фазу відновлення і зростання після 2012 року, але зональний аналіз уточнює, які типи територій найбільше формують це зростання.

3.6 Порівняння KNDVI з іншими спектральними індексами

Окрім KNDVI, у межах додаткового аналізу було розглянуто інші спектральні індекси, які можуть бути розраховані на основі супутникових даних Landsat за подібною методикою. Їх використання не змінює основного фокусу дослідження, однак дає змогу краще інтерпретувати поведінку KNDVI в умовах неоднорідного міського середовища. Вегетаційні індекси NDVI, EVI та MSAVI характеризують стан рослинності з різними поправками на біомасу, атмосферний вплив або ґрунтовий фон. Індекси NDWI, NDBI та BSI

відображають інші властивості поверхні, пов'язані з вологістю, забудовою та відкритими ґрунтами.

Таблиця 3.4 Узагальнення напрямів трендів додаткових спектральних індексів для території Вінниці, 1990-2021 роки

Індекс	Зміст	$\beta_1/\text{рік}$	p-value	Напрямок
KNDVI	ядровий вегетаційний індекс, основний показник роботи	0.0004	0,456	статистично незначущий тренд
EVI	підсилений вегетаційний індекс, чутливий до ділянок з вищою біомасою	-0.0010	0,014	зниження
MSAVI	модифікований ґрунтово-скоригований індекс рослинності	-0.0005	0,198	статистично незначущий тренд
NDWI	індекс водного/вологісного компонента	-0.0008	0,110	статистично незначущий тренд
NDBI	індекс забудованості	0.0010	0,032	зростання
BSI	індекс відкритого ґрунту	0.0012	0,007	зростання

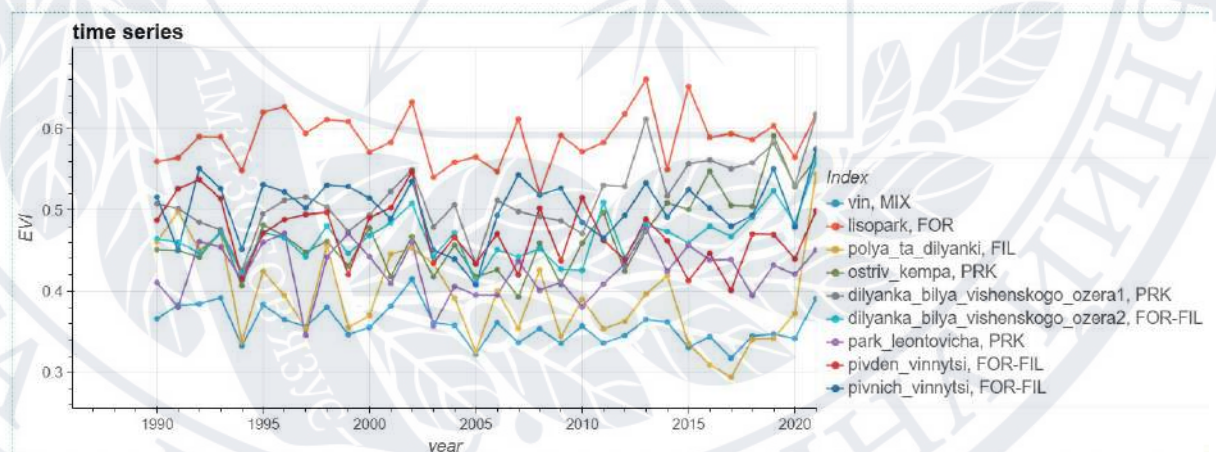


Рис. 3.8. Часові ряди індексу EVI протягом 1990-2021 років



Рис. 3.9. Часові ряди індексу MSAVI протягом 1990-2021 років

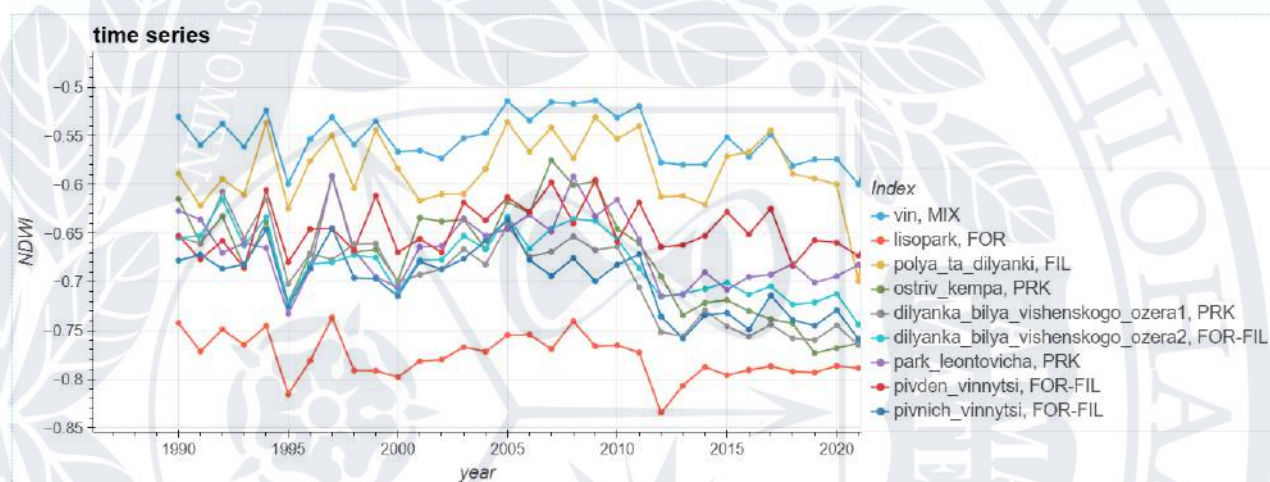


Рис. 3.10. Часові ряди індексу NDWI протягом 1990-2021 років

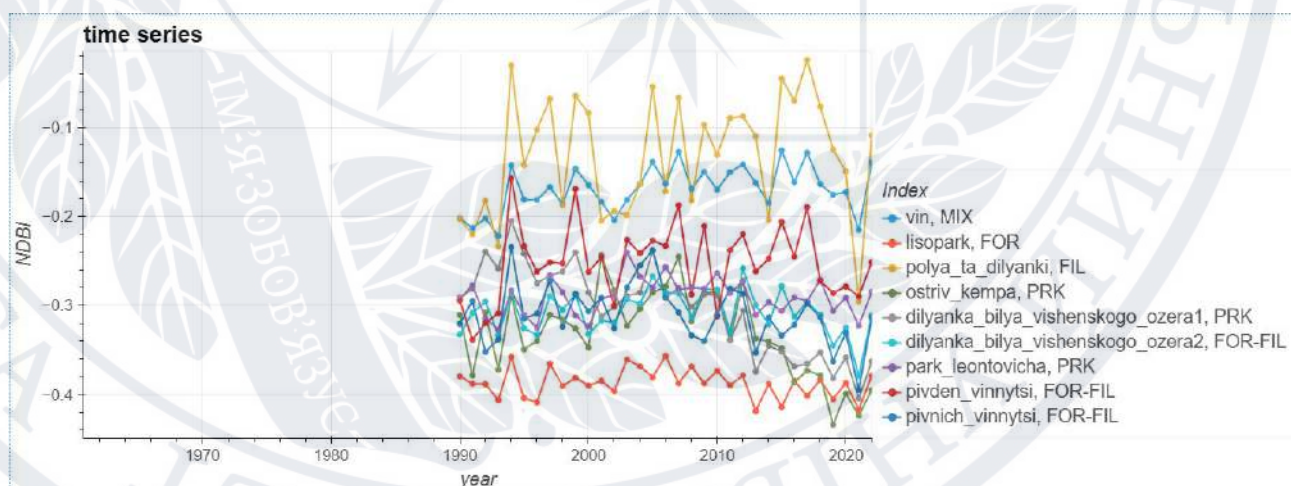


Рис. 3.11. Часові ряди індексу NDBI протягом 1990-2021 років



Рис. 3.12. Часові ряди індексу BSI протягом 1990-2021 років

Порівняння з іншими індексами показує, що KNDVI узгоджується з іншими вегетаційними показниками, але має власну перевагу для аналізу щільної та неоднорідної міської рослинності. EVI, MSAVI та NDVI можуть використовуватися як допоміжні індикатори для перевірки загального напрямку змін, тоді як NDBI та BSI допомагають відокремлювати вплив забудованих і відкритих ґрунтових поверхонь. У цьому контексті додаткові індекси доцільно розглядати не як заміну KNDVI, а як інструмент перевірки та пояснення отриманих результатів.

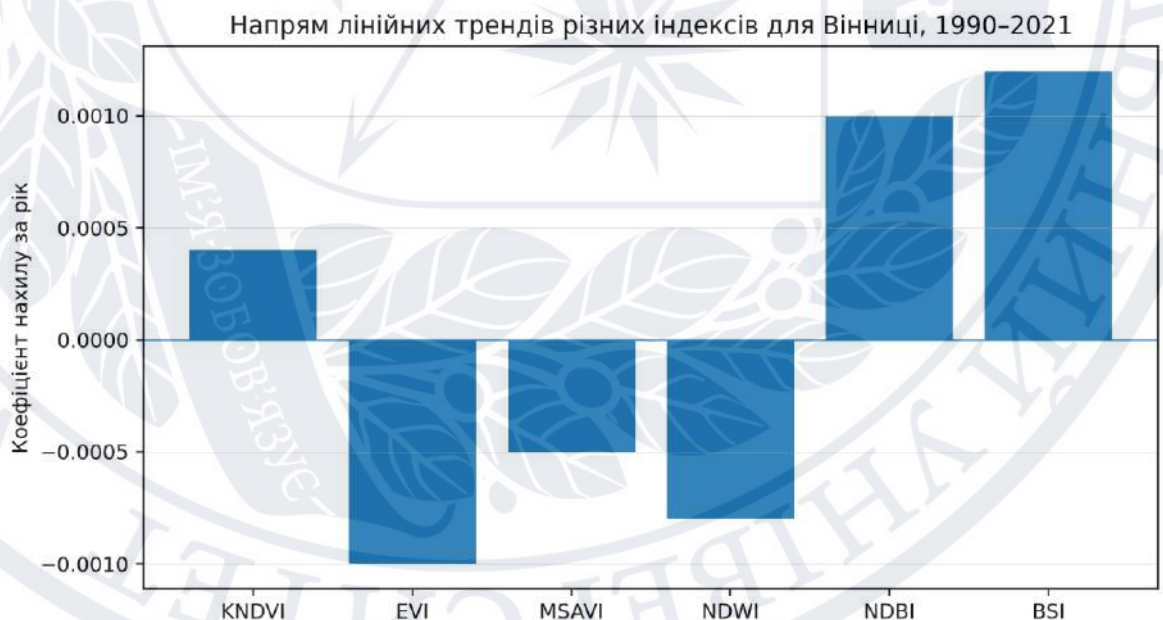


Рис. 3.13. Напрямок лінійних трендів різних спектральних індексів для території Вінниці, 1990-2021 роки

3.7 Екологічна інтерпретація отриманих результатів

Отримані результати свідчать про те, що у другій частині досліджуваного періоду у Вінниці сформувався виразний позитивний тренд KNDVI. Просторова прив'язаність цих трендів до зелених масивів і прибережних територій дозволяє припустити, що основним механізмом зростання є не стільки розширення площі озелених територій у щільній забудові, скільки структурне посилення вже наявної рослинності. Це може включати дозрівання дерев, збільшення щільності крон, покращення стану насаджень або природне заростання окремих ділянок.

З екологічного погляду такий результат є позитивним, але він також має управлінські наслідки. Якщо зростання KNDVI значною мірою забезпечене вже існуючими лісопарковими та прибережними зонами, то їх збереження стає критично важливим для підтримання екологічної стійкості міста. Втрата таких територій може мати непропорційно великий вплив на загальний стан зеленої інфраструктури, навіть якщо формальна площа дрібних озелених ділянок у місті зберігатиметься.

Водночас індексний аналіз не дозволяє однозначно відокремити вплив кліматичних чинників від впливу землекористування. Наприклад, підвищення KNDVI може бути пов'язане з більш вологими або сприятливими для росту роками, а зниження – із посухами або тепловими стресами. Для уточнення причин виявлених трендів у майбутньому доцільно інтегрувати дані ERA5 або інші кліматичні ряди температури й опадів, а також інформацію про зміни землекористування.

3.8 Практичне значення результатів для міського екологічного моніторингу

Результати роботи можуть бути використані як аналітична основа для міського екологічного моніторингу. Карти статистично значущих трендів дозволяють визначити ділянки, де рослинність демонструє стійке зростання або зниження індексу. Для позитивних ділянок важливо з'ясувати, які просторові та

управлінські умови сприяли поліпшенню стану рослинності. Для негативних ділянок доцільно провести додатковий аналіз причин, оскільки вони можуть вказувати на території потенційної деградації або трансформації зелених насаджень.

Запропонований Python/GEE-робочий процес може бути повторений у майбутні роки. Якщо додавати нові річні композити, місто може отримувати оновлювану картину змін рослинності без необхідності повністю перебудовувати методик. Крім того, цей підхід можна розширити шляхом додавання інших індексів: EVI для перевірки високобіомасних ділянок, NDBI для оцінювання забудови, NDWI для аналізу водного режиму, а також температури поверхні для дослідження взаємозв'язку між рослинністю та міським тепловим середовищем.

Для практичного застосування варто враховувати, що супутниковий індекс є інструментом скринінгу, а не остаточним доказом конкретного процесу на землі. Найкращі результати він дає у поєднанні з іншими джерелами: польовими обстеженнями, інвентаризацією зелених насаджень, містобудівними даними, матеріалами аерофотознімання або високодетальними супутниковими зображеннями. У такій системі KNDVI може виконувати роль довгострокового індикатора, що показує, де саме варто зосередити детальнішу увагу.

ВИСНОВКИ

1. У роботі обґрунтовано доцільність використання індексу KNDVI для дослідження довгострокової динаміки міської рослинності. На відміну від класичного NDVI, KNDVI є нелінійною трансформацією, що базується на ядровому підході та може краще відображати зміни у щільних деревних насадженнях. Це робить його придатним для аналізу лісопаркових, прибережних, паркових і периферійних зелених зон міста.
2. Сформовано відтворюваний методичний підхід до аналізу KNDVI у Вінниці за 1990–2021 роки на основі супутникових даних Landsat Collection 2 Level-2. Основні етапи — фільтрація знімків, маскування хмар і тіней, створення річних медіанних композитів, розрахунок індексу та подальший статистичний аналіз — реалізовано з використанням Google Earth Engine і Python API. Такий підхід забезпечує відтворюваність дослідження та може бути адаптований для розрахунку інших спектральних індексів.
3. Часова серія медіанного KNDVI для території Вінниці показала наявність кількох фаз динаміки: відносно стабільні коливання у 1990-х роках, підвищені значення на початку 2000-х, спад у 2005–2011 роках і подальше відновлення та зростання після 2012 року. Найвище медіанне значення KNDVI за досліджуваний період зафіксовано у 2021 році.
4. Піксельний лінійний регресійний аналіз засвідчив зростання частки статистично значущих трендів із 30,41 % у 1990–2005 роках до 59,64 % у 2005–2021 роках. У першому підперіоді тренди мали змішаний характер, тоді як у другому підперіоді переважали додатні тренди, що становили 88,30 % від кількості статистично значущих пікселів. Це свідчить про посилення процесів озеленення у другій частині досліджуваного періоду.
5. Просторова структура результатів показала, що позитивні тренди KNDVI концентруються переважно в лісопаркових, прибережних і периферійних зелених зонах. Це дає підстави припустити, що загальне зростання KNDVI пов'язане передусім із дозріванням, ущільненням і підвищенням

спектральної активності вже наявної зеленої інфраструктури, а не лише з розширенням озелених площ у щільно забудованих районах.

6. Додатковий зональний аналіз підтвердив, що загальноміська динаміка KNDVI формується неоднорідно. Лісопаркові, паркові, прибережні та островні території демонструють більш чітку й інтерпретовану рослинну динаміку, тоді як аграрні та відкриті ділянки на периферії міста мають більшу мінливість, пов'язану з відкритим ґрунтом, сезонністю, характером землекористування та сільськогосподарськими процесами. Це підтверджує доцільність аналізу не лише всієї території міста загалом, а й окремих функціонально різних ділянок.

7. Порівняння KNDVI з іншими спектральними індексами показало, що вегетаційні індекси NDVI, EVI та MSAVI можуть використовуватися як додаткові показники для перевірки й уточнення результатів аналізу рослинності. Водночас NDWI, NDBI та BSI дають змогу ширше інтерпретувати міське середовище, оскільки відображають вплив водних об'єктів, забудованих поверхонь і відкритого ґрунту. Таким чином, KNDVI доцільно розглядати як основний індекс дослідження, а інші індекси — як допоміжні інструменти комплексної характеристики екологічного стану міського простору.

8. Практичне значення роботи полягає у можливості використання карт трендів KNDVI і результатів зонального аналізу для виявлення територій позитивної динаміки та потенційної деградації рослинності. Запропонований підхід може бути застосований для регулярного міського екологічного моніторингу, оцінювання стану зеленої інфраструктури, визначення ділянок, які потребують додаткової уваги, а також для підтримки управлінських рішень щодо збереження лісопаркових, прибережних і паркових територій.

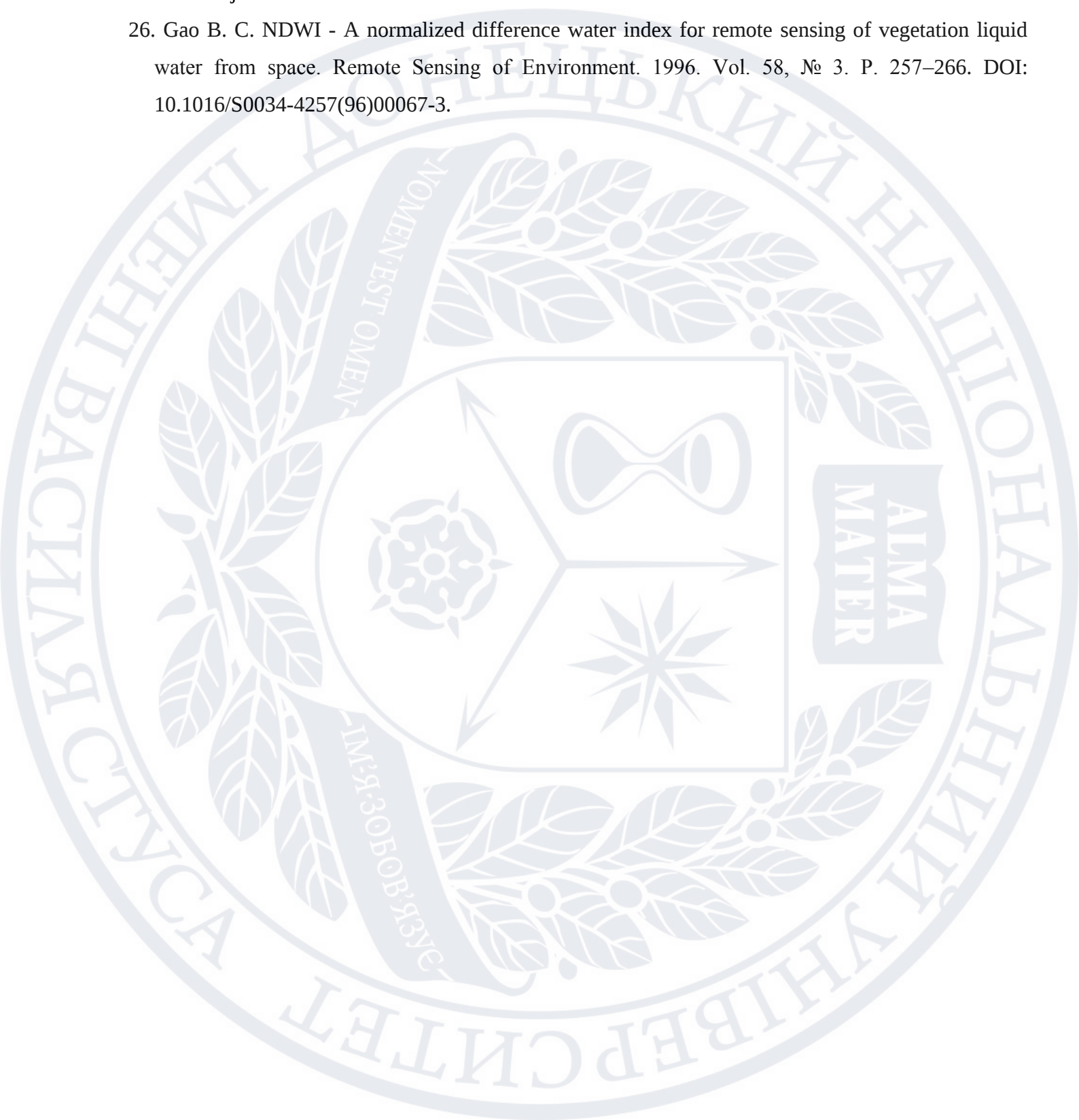
9. Подальші дослідження доцільно спрямувати на інтеграцію кліматичних рядів температури й опадів, аналіз змін землекористування, зіставлення результатів із температурою поверхні, а також на валідацію окремих ділянок за польовими матеріалами, високодетальними супутниковими знімками або даними інвентаризації зелених насаджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЛІТЕРАТУРИ

1. Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Washington, DC : NASA, 1974. Vol. 1. P. 309–317.
2. Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 1979. Vol. 8, № 2. P. 127–150. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
3. Pettorelli N., Vik J. O., Mysterud A., Gaillard J.-M., Tucker C. J., Stenseth N. C. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*. 2005. Vol. 20, № 9. P. 503–510. DOI: 10.1016/j.tree.2005.05.011.
4. Huete A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 1988. Vol. 25, № 3. P. 295–309. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.
5. Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E. P., Gao X., Ferreira L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol. 83, № 1–2. P. 195–213. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2.
6. Camps-Valls G., Campos-Taberner M., Moreno-Martínez Á., Walther S., Duveiller G., Cescatti A., Mahecha M. D., Muñoz-Marí J., García-Haro F. J., Guanter L., Jung M., Gamon J. A., Reichstein M., Running S. W. A unified vegetation index for quantifying the terrestrial biosphere. *Science Advances*. 2021. Vol. 7, № 9. eabc7447. DOI: 10.1126/sciadv.abc7447.
7. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 202. P. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
8. U.S. Geological Survey. Landsat Collection 2 Level-2 Science Products. Fact Sheet 2021–3055. Reston, VA : U.S. Geological Survey, 2021. DOI: 10.3133/fs20213055.
9. U.S. Geological Survey. Landsat 4-7 Collection 2 Level 2 Science Product Guide. Version 3.0. Sioux Falls, SD : USGS, 2020.
10. U.S. Geological Survey. Landsat 8-9 Collection 2 Level 2 Science Product Guide. Version 6.0. Sioux Falls, SD : USGS, 2024.
11. Google Earth Engine Data Catalog. USGS Landsat 5 Level 2, Collection 2, Tier 1. URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LT05_C02_T1_L2 (дата звернення: 05.05.2026).
12. Google Earth Engine Data Catalog. USGS Landsat 8 Level 2, Collection 2, Tier 1. URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LC08_C02_T1_L2 (дата звернення: 05.05.2026).

13. Shahtahmassebi A. R., Li C., Fan Y., Wu Y., Lin Y., Gan M., Wang K., Malik A., Blackburn G. A. Remote sensing of urban green spaces: A review. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2021. Vol. 57. 126946. DOI: 10.1016/j.ufug.2020.126946.
14. Liu O. Y., Russo A. Assessing the contribution of urban green spaces in green infrastructure strategy planning for urban ecosystem conditions and services. *Sustainable Cities and Society*. 2021. Vol. 68. 102772. DOI: 10.1016/j.scs.2021.102772.
15. Nowak D. J., Crane D. E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution*. 2002. Vol. 116, № 3. P. 381–389. DOI: 10.1016/S0269-7491(01)00214-7.
16. Weng Q., Lu D., Schubring J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*. 2004. Vol. 89, № 4. P. 467–483. DOI: 10.1016/j.rse.2003.11.005.
17. Zha Y., Gao J., Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2003. Vol. 24, № 3. P. 583–594. DOI: 10.1080/01431160304987.
18. Xu H. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2006. Vol. 27, № 14. P. 3025–3033. DOI: 10.1080/01431160600589179.
19. Kennedy R. E., Yang Z., Cohen W. B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr - Temporal segmentation algorithms. *Remote Sensing of Environment*. 2010. Vol. 114, № 12. P. 2897–2910. DOI: 10.1016/j.rse.2010.07.008.
20. Mann H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*. 1945. Vol. 13, № 3. P. 245–259. DOI: 10.2307/1907187.
21. Sen P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*. 1968. Vol. 63, № 324. P. 1379–1389. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934.
22. Guo J., Wang K., Wang T., Bai N., Zhang H., Cao Y., Liu H. Spatiotemporal Variation of Vegetation NDVI and Its Climatic Driving Forces in Global Land Surface. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2022. Vol. 31, № 4. P. 3541–3549. DOI: 10.15244/pjoes/147194.
23. Fensholt R., Proud S. R. Evaluation of Earth Observation based global long term vegetation trends - Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series. *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 119. P. 131–147. DOI: 10.1016/j.rse.2011.12.015.
24. Carlson T. N., Ripley D. A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*. 1997. Vol. 62, № 3. P. 241–252. DOI: 10.1016/S0034-4257(97)00104-1.

25. Jiang Z., Huete A. R., Didan K., Miura T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*. 2008. Vol. 112, № 10. P. 3833–3845. DOI: 10.1016/j.rse.2008.06.006.
26. Gao B. C. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*. 1996. Vol. 58, № 3. P. 257–266. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.



ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Фрагмент Python/GEE-коду для формування річних Індекс-композитів

```
import json
import os
from typing import Optional

import ee

import geemap
import osmnx as ox

import pandas as pd
import geopandas as gpd
import rasterio
import numpy as np
import glob
import rioxarray as rxr
import xarray as xr

import leafmap

import hvplot.xarray
import tempfile

import holoviews as hv
import panel as pn

from pathlib import Path
from typing import Optional

import numpy as np
import rasterio
from scipy import stats
import pingouin as pg
import seaborn as sns
import statsmodels.api as sm
import statsmodels.formula.api as smf

import matplotlib.pyplot as plt
import hvplot.pandas

import sys
sys.path.append(r'/home/user/wk/lib/rs')
import xarray_utils as xu
def lr(x,y):

    xy=pd.DataFrame({'x':x,'y':y})
    model = smf.ols(formula='y ~ x', data=xy).fit()

    #model = sm.OLS(y, sm.add_constant(x)).fit()

    b,a=model.params
    r2=model.rsquared
    r2adj=model.rsquared_adj
    pvalue_b, pvalue_a = model.pvalues
```

```

return {
    'slope': a,
    'intercept': b,
    'r2': r2,
    'pvalue': pvalue_a,
    'n': len(x)
}
}

idx_sel_nm = ['KNDVT','EVT','MSAVT','NDWT','NDBI','BSI']
BANDS_MD_OVER_SPACE_DF = pd.read_csv('vin_zones_time_series-1.csv')
def res_report(bn):
    F1=(BANDS_MD_OVER_SPACE_DF.hvplot.line(x='year', y=bn,
by=['name','class'],fontscale=1.5,height=500,width=1400,grid=True) *
BANDS_MD_OVER_SPACE_DF.hvplot.scatter(x='year', y=bn, by=['name','class']))\
    .opts(legend_opts={'title': 'Index','click_policy': 'hide'},title='time series')

    df = BANDS_MD_OVER_SPACE_DF.copy()
    df['label'] = df.name+', '+df['class']
    # idx_vals = df.pivot(index='year', columns='name', values=bn)
    idx_vals = df.pivot(index='year', columns='label', values=bn)
    idx_vals_nrm = (idx_vals - idx_vals.mean())/idx_vals.std()
    F2=(idx_vals_nrm.hvplot.line(fontscale=1.5,
                                height=500,width=1400,
                                grid=True,
                                ylabel='Standardized Values') *
idx_vals_nrm.hvplot.scatter()).opts(legend_opts={'title': 'Index','click_policy': 'hide'}, title='standardized time series')

    #lin regr
    df = BANDS_MD_OVER_SPACE_DF.copy()
    df['label'] = df.name+', '+df['class']
    # idx_vals = df.pivot(index='year', columns='name', values=bn)
    idx_vals = df.pivot(index='year', columns='label', values=bn)

    lr_res = idx_vals.apply(lambda y: lr(idx_vals.index.values,y), result_type='expand')
    lr_res

    lr_line = lr_res.apply(lambda y: idx_vals.index.values*y.slope + y.intercept)
    lr_line.index = idx_vals.index

    T_LR1 = lr_res.T.sort_values(by='r2',ascending=False).style
    T_LR2 = lr_res.T.sort_values(by='slope', ascending=False, key=abs).style

    F=[]
    for cn in lr_res.T.r2.sort_values(ascending=False).index.values:
        title=f'{cn}\nslope={lr_res[cn].slope.round(4)} r2={lr_res[cn].r2.round(4)} p={lr_res[cn].pvalue.round(4)}'
        f1=idx_vals.hvplot.scatter(x='year',y=cn, title=title, fontscale=1.5,color='red',width=600)
        f2=lr_line.hvplot.line(x='year',y=cn, title=title, fontscale=1.4,ylabel=bn,width=600)
        f2=f2.opts( fontsize={'title': 10})
        F.append(f1*f2)
    F3=hv.Layout(F).cols(2)

    # corr
    df = BANDS_MD_OVER_SPACE_DF.copy()
    df['label'] = df.name+', '+df['class']
    # idx_vals = df.pivot(index='year', columns='name', values=bn)
    idx_vals = df.pivot(index='year', columns='label', values=bn)
    corr_res = pg.pairwise_corr(idx_vals)

    F4=corr_res.hvplot.heatmap(x='X',y='Y',C='r',rot=90,cmap='coolwarm',fontscale=1.8,height=800,width=1000,title=bn)
    .opts( fontsize={'title': 8})

```

```

df=corr_res[(corr_res.r.abs()>0.5) & (corr_res['p-unc']<0.05) & (corr_res.Y=='vin,
MIX')].sort_values(by='r',ascending=False,key=abs)[['X', 'Y', 'r', 'CI95%', 'p-unc']]
T_CR1=df.style.hide(axis='index')

df=corr_res[(corr_res.r.abs()>0.5) & (corr_res['p-unc']<0.05)].sort_values(by='r',ascending=False,key=abs)[['X', 'Y',
'r', 'CI95%', 'p-unc']]
T_CR2=df.style.hide(axis='index')

for o in [F1,F2, T_LR1,T_LR2,F3, F4,T_CR1,T_CR2]:
    display(o)
# display(F1)
# display(F2)
# display(T_LR1)
# dispal,T_LR2,F3, F4,T_CR1,T_CR2)

return [F1,F2, T_LR1,T_LR2,F3, F4,T_CR1,T_CR2]
for bn in idx_sel_nm:
    print(bn)
    [F1,F2, T_LR1,T_LR2,F3, F4,T_CR1,T_CR2]=res_report(bn)
    print("\n")
    print('+++++')
    print("\n\n")

```