

Водночас Ділянка №1, попри найвищу кількість транспортних одиниць за добу, посідає лише друге місце за рівнем забруднення повітря (рис. 2). Це пояснюється сприятливими умовами для провітрювання: лише частина вулиці забудована багатоповерхівками, тоді як інша межує з парком і ставом, що поліпшує вентиляцію території та знижує концентрацію шкідливих домішок у повітрі.

Найнижчий рівень СО зафіксовано на Ділянках №7 і №8 – 28,04 мг/м³ (рис. 3), хоча транспортне навантаження там залишається доволі високим. Це знову ж таки свідчить про вирішальне значення відкритих просторів і озеленення для підтримання сприятливого стану атмосферного повітря.

Результати дослідження підтверджують, що рівень забруднення повітря в міських транспортних вузлах залежить не лише від інтенсивності руху, а й від просторової організації забудови та наявності зелених зон. Ділянки з однаковим транспортним навантаженням можуть суттєво відрізнятися за концентрацією забруднювальних речовин через особливості провітрюваності. Це вказує на необхідність комплексного підходу до організації транспортного руху та містобудівного планування для зменшення екологічного навантаження на урбоекосистему.

Список використаних джерел

1. Rezaei N, Millard-Ball A. (2023). Urban form and its impacts on air pollution and access to green space: A global analysis of 462 cities. *PLoS One*. Jan 25;18(1):e0278265. doi: 10.1371/journal.
2. Wu, B., & Liu, C. (2023). Impacts of Building Environment and Urban Green Space Features on Urban Air Quality: Focusing on Interaction Effects and Nonlinearity. *Buildings*, 13(12), 3111. <https://doi.org/10.3390/buildings13123111>.
3. Рудакевич І.Р. Картографічне моделювання транспортних потоків у місті Тернопіль. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету ім. В. Гнатюка. Серія: географія*. Тернопіль: СМП “Тайп”, 2018. № 1 (вип. 44). С. 71–80.
4. Серкіз А. Вплив міського автотранспорту на стан атмосферного повітря вулиці Руська та проспекту Степана Бандери міста Тернополя. *Моделювання еколого-географічних систем : матеріали звітної наукової конференції викладачів, аспірантів, магістрантів, студентів кафедри геоєкології та методики навчання екологічних дисциплін та НДЛ*. Тернопіль, 2021. С. 68–73.
5. Серкіз А.С. Екологічний стан повітряного середовища міста Тернополя на прикладі мікрорайону “Східний”: магістерська, магістр: 01.10.2019 / Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка. Тернопіль, 2019.
6. Фесюк В.О., Мороз І. А. Сучасний стан забруднення атмосферного повітря міста Луцьк. *Вісник Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*. Харків, 2021. № 54.
7. Царик Л.П., Царик П. Л., Янковська Л. В., Кузик І. Р. Геоєкологічні параметри компонентів навколишнього середовища міста Тернополя. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія Географія*. Тернопіль, 2019. № 1. С. 198–210.

ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИЙ АНАЛІЗ ЗМІН ЯКОСТІ ПОВІТРЯ ТА ВОДИ В УМОВАХ УРБАНІЗАЦІЇ ТЕРНОПОЛЯ ЗА ДАНИМИ ДЗЗ (2019-2024 РР.)

Наталія ТАРАНОВА, Андрій ВАРЕНИК

Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка
Тернопіль, Україна

Abstract. The development of urbanization processes in Ternopil from 2019 to 2024 has led to significant environmental changes, including increased built-up areas, deterioration of air quality, and alterations in the state of water resources. The use of satellite data from Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-5P, and NASA FIRMS enabled the identification of spatio-temporal pollution patterns and the assessment of environmental risks.

Key words: urbanization, remote sensing, environmental monitoring, air quality, surface water quality.

Постановка науково-практичної проблеми. Інтенсивний розвиток урбанізаційних процесів в Україні, зокрема в малих та середніх містах, зумовлює значний антропогенний вплив на міське середовище. Збільшення щільності забудови, інтенсифікація транспортного

руху, зростання кількості промислових об'єктів та зменшення площі зелених насаджень сприяють погіршенню екологічного стану міських екосистем. Найбільш вразливими компонентами є атмосферне повітря та поверхневі водні ресурси, які чутливо реагують на зміни, індуковані урбанізацією. Забруднення атмосферного повітря дрібнодисперсними частинками ($PM_{2.5}$), діоксидом азоту (NO_2), озоном (O_3), а також зниження якості води у річках та водоймах призводять до зростання екологічних ризиків для здоров'я населення та ускладнюють досягнення сталого розвитку міста.

В умовах обмежених можливостей традиційних методів спостереження важливого значення набуває використання супутникових технологій для здійснення регулярного, просторово-цілісного та верифікованого моніторингу стану довкілля. Платформа Sentinel-5P (місія Європейського космічного агентства) надає змогу оперативно виявляти концентрації атмосферних забруднювачів, таких як NO_2 , O_3 та аерозолі, тоді як супутники Landsat (місії NASA/USGS) забезпечують високоточні дані для аналізу динаміки водного балансу, якісних характеристик поверхневих вод та стану міських зелених зон.

Інтеграція даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) у геоінформаційні системи (ГІС) відкриває нові перспективи для моделювання просторово-часової динаміки екологічних процесів, зокрема для аналізу поширення забруднення, ідентифікації зон підвищеного екологічного ризику та забезпечення інформаційної підтримки прийняття управлінських рішень на муніципальному рівні. Відтак, постає актуальне науково-практичне завдання щодо вдосконалення інструментарію оцінки якості атмосферного повітря та поверхневих вод із застосуванням даних супутникового моніторингу, особливо в умовах динамічного урбанізаційного розвитку міст, таких як Тернопіль.

Актуальність і новизна дослідження. Сучасний етап розвитку українських міст характеризується стрімким зростанням урбанізаційного навантаження, що призводить до істотних трансформацій міського середовища та погіршення ключових екологічних параметрів – якості атмосферного повітря, стану поверхневих вод і деградації зелених зон. Ці процеси несуть безпосередню загрозу екологічній безпеці, здоров'ю населення, а також перешкоджають досягненню цілей сталого міського розвитку. Особливої актуальності дане дослідження набуває в контексті недостатньої інтеграції геоінформаційних технологій у практику екологічного моніторингу міст України.

Необхідність отримання об'єктивної, просторово деталізованої та регулярно оновлюваної інформації про стан довкілля обумовлює потребу у впровадженні сучасних інструментів аналізу на основі даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Використання супутникової інформації дозволяє оперативно виявляти небезпечні зміни в урбоекосистемах і забезпечити науково обґрунтовану базу для прийняття управлінських рішень у сфері охорони довкілля, адаптації до кліматичних змін та міського планування.

Наукова новизна дослідження полягає у наступному: вперше для міста Тернопіль здійснено комплексну просторово-часову оцінку стану атмосферного повітря, водних ресурсів та рослинного покриву з використанням супутникових даних Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-5P; запропоновано інтегровану методику, що поєднує аналіз спектральних індексів AQI, AOD (для повітря), NDWI (для водних об'єктів), NDVI (для рослинності); розроблено підхід до оцінки змін у забудові за даними Sentinel-1, що дозволяє відстежити розширення урбанізованих територій та зміну гідрологічного режиму; індекси адаптовано до умов середньостатистичного українського міста з урахуванням локальної структури забудови, кліматичних умов, морфометрії рельєфу та структури зелених зон; визначено потенціал використання супутникових даних у контексті стратегічного планування та формування екологічної політики на місцевому рівні. Запропонована методика може бути масштабована на інші міста України, зокрема у регіонах із недостатньо розвиненою наземною мережею моніторингу. Таким чином, результати дослідження мають як наукове, так і прикладне значення для забезпечення екологічної безпеки та сталого міського розвитку.

Зв'язок теми статті з важливими науково-практичними завданнями. Тема

дослідження безпосередньо пов'язана з реалізацією ключових міжнародних та національних стратегій у сфері екологічної безпеки, адаптації до кліматичних змін, просторового планування й сталого розвитку урбанізованих територій. Проведений аналіз відповідає цілям сталого розвитку ООН (зокрема, ЦСР №11 «Сталий розвиток міст і спільнот» та ЦСР №13 «Боротьба зі зміною клімату»), а також завданням Державної екологічної політики України на період до 2030 року.

Практичне значення отриманих результатів полягає у: вдосконаленні методології екологічного моніторингу міських територій із застосуванням багатоспектральних і радарних супутникових даних (Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-5P) на платформі Copernicus Browser; створенні аналітичної бази для формування науково обґрунтованих рішень у сфері управління міським середовищем, що є особливо актуальним для місцевих органів влади й громад у контексті децентралізації; інтеграції результатів у сферу містобудування, ландшафтного планування та зонування територій з урахуванням екологічних обмежень і ризиків; сприянні формуванню відкритих геоінформаційних ресурсів, які можуть бути використані для залучення громадськості до процесів моніторингу й прийняття екологічно доцільних рішень на локальному рівні.

У регіональному контексті дослідження реалізовано на прикладі Тернопільської області – регіону з високою ландшафтною різноманітністю, значним рівнем урбанізації (особливо в межах міста Тернополя), складними умовами природокористування та підвищеною чутливістю до кліматичних змін. Проведений аналіз дозволяє не лише виявити поточні екологічні виклики, а й запропонувати адаптивні підходи до управління просторовим розвитком на засадах екологічної стійкості.

Дослідження виконано в рамках наукової теми «Географія регіону: особливості природи, соціально-економічного розвитку та раціонального природокористування (на прикладі Тернопільської області)» (Державний реєстраційний номер 0123U102189). Науковий керівник: д. геогр. наук, професор Заставецька Л.Б.

Аналіз останніх публікацій за темою дослідження. У сучасних геоекоекологічних дослідженнях зростає роль супутникових технологій, зокрема даних дистанційного зондування Землі, для моніторингу стану довкілля в урбанізованих регіонах. Одним із найефективніших інструментів для оцінювання якості атмосферного повітря є дані супутника Sentinel-5P із приладом TROPOMI, який забезпечує високу просторово-часову роздільність у виявленні ключових забруднювачів (NO_2 , SO_2 , CO , O_3 , HCHO). У дослідженні М. Савенця та І. Дворецької проаналізовано розподіл діоксиду азоту, діоксиду сірки, чадного газу та формальдегіду над територією України та суміжних морських акваторій за допомогою даних Sentinel-5P. Результати показали, що найвищі концентрації NO_2 спостерігались у Києві та промислових районах Донбасу, що підтверджує вплив урбанізації на якість повітря [13]. У наступному дослідженні М. Савенця з колегами вивчено вплив лісових пожеж на атмосферу України. Супутникові спостереження засвідчили істотне зростання концентрацій NO_2 у зонах активного горіння, що свідчить про здатність Sentinel-5P фіксувати як антропогенні, так і природні джерела забруднення [7]. Значну наукову цінність мають і міжнародні праці. Зокрема, у статті Bauwens et al., опублікованій у журналі Remote Sensing, досліджено зниження рівнів NO_2 над мегаполісами Європи під час карантину, зумовленого пандемією COVID-19, що продемонструвало високу чутливість супутникового моніторингу до змін у господарській діяльності [2]. Додатково, у дослідженнях, опублікованих у Atmospheric Measurement Techniques [11] та ISPRS Archives [3], проведено валідацію супутникових даних Sentinel-5P через порівняння з наземними станціями (NDACC, Pandonia, MAX-DOAS). Це підтвердило високу кореляцію між дистанційними та наземними спостереженнями, що засвідчує надійність цих даних для екологічного аналізу. Щодо гідроекологічного моніторингу, індекси NDWI (Normalized Difference Water Index) широко застосовуються для визначення площ водних об'єктів, оцінки цвітіння, прозорості та стану прибережних зон. Наприклад, у дослідженні, присвяченому Одеській затоці Чорного моря, ефективно використано NDWI для виявлення змін берегової лінії та водного дзеркала в умовах антропогенного тиску [12]. Таким чином, у

Покадровий відеоаналіз, створений на основі серії радарних зображень Sentinel-1 за період з червня 2019 по серпень 2024 року, дає змогу простежити динаміку змін урбанізованої території Тернополя. Застосування комбінації поляризацій VV, VH та їхнього співвідношення дозволяє чітко розрізнити типи земного покриття та фіксувати їх трансформації в часі.

Ключові спостереження: водні об'єкти (темні плями) протягом п'ятирічного періоду зафіксовано коливання площі та контурів водного дзеркала, зокрема Тернопільського ставу. Це може бути пов'язано як із сезонними чинниками (рівень опадів, випаровування), так і з техногенним регулюванням рівня води.

Міська забудова (жовті та світло-жовті ділянки) виявлено розширення зон із підвищеним радарним зворотним сигналом, що відповідає інтенсивному розвитку житлової та комерційної інфраструктури. Фіксується збільшення площ нової забудови та ущільнення існуючих міських структур.

Рослинний покрив (бірюзові та зелені ділянки) відзначено сезонні зміни інтенсивності сигналу, що відповідає періодам активної вегетації (весна–літо) та її спадання (осінь–зима). Це дозволяє оцінити загальний стан та динаміку зелених насаджень у місті.

Оголені або слабо заселені території (фіолетові ділянки) зміни цих зон пов'язані із впливом сільськогосподарської діяльності, підготовкою ділянок до забудови чи змінами у землекористуванні, що відображається на змінах текстури та кольору на знімках.

У цілому, покадровий супутниковий моніторинг на основі Sentinel-1 дозволяє комплексно оцінити просторово-часову динаміку урбанізаційних процесів у Тернополі. Зміни у яскравості та кольоровій палітрі зображень чітко відображають трансформацію ландшафтів під впливом природних та антропогенних факторів, що є важливим для подальшого екологічного планування та управління міським середовищем.

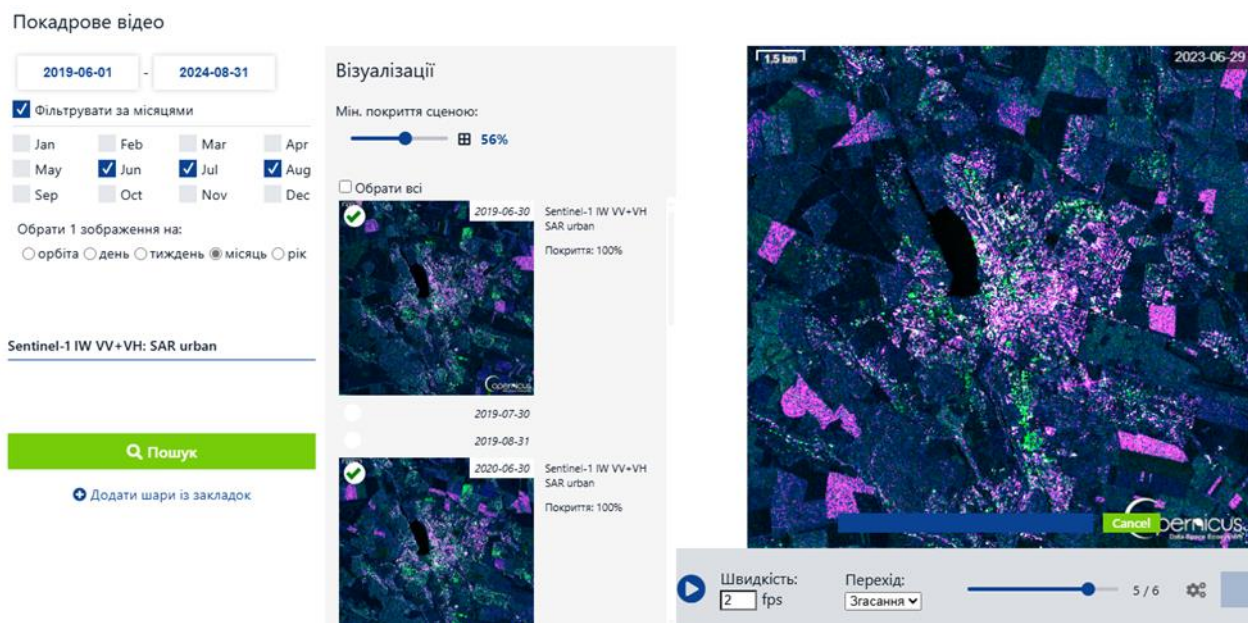


Рис. 3. Просторово-часова динаміка урбанізації Тернополя за даними Sentinel-1 SAR (2019–2024 рр.) [8].

На серії радарних знімків Sentinel-1 (режим IW, поляризація VV+VH) відображено динаміку урбанізаційних змін у Тернополі в період 2019–2024 рр. Кольорова композиція (червоний — VV, зелений — VH, синій — VH/VV) дозволяє візуалізувати розвиток міської забудови (фіолетові та жовто-зелені ділянки), рослинного покриття (зелено-бірюзові області) та інших елементів ландшафту.

Аналіз знімків за кожен рік демонструє поступове розширення урбанізованих територій, особливо на околицях міста, та трансформацію зелених зон. Найінтенсивніші

зміни фіксуються у 2021–2023 роках, що пов'язано з розвитком житлової й транспортної інфраструктури.

Дані Sentinel-1 також дозволили виявити: скорочення площ зелених насаджень і формування «теплого острова»; сезонні зміни в рослинному покриві та водному дзеркалі; потенційний негативний вплив урбанізації на якість повітря й екологічну стабільність міста.

Результати дослідження є основою для раціонального містобудівного планування, екологічного моніторингу та створення геоінформаційних моделей розвитку міського середовища.

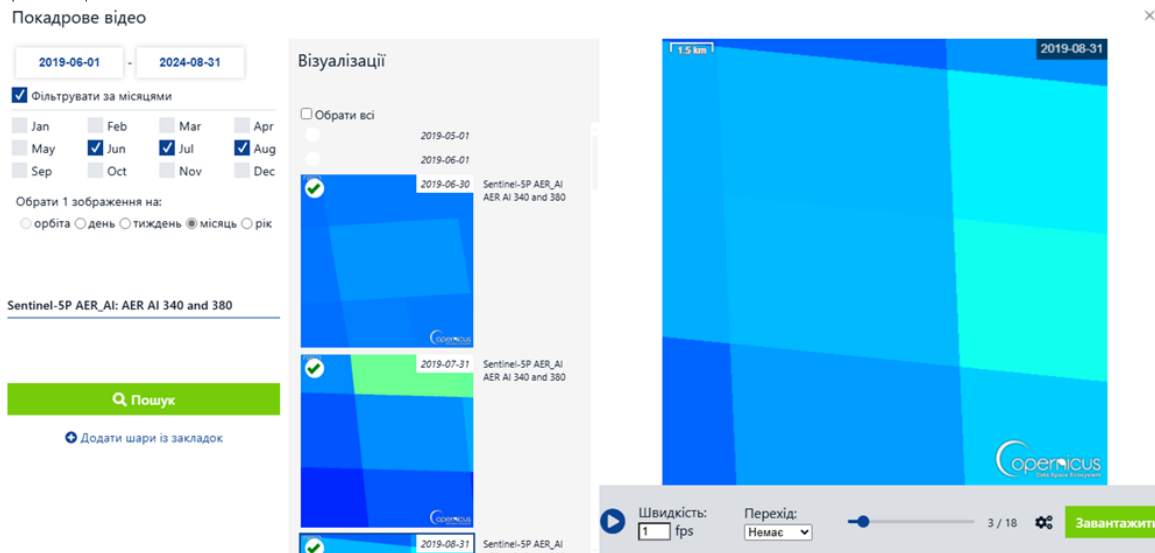


Рис. 4. Динаміка аерозольного індексу AER_AI над Тернополем за даними Sentinel-5P (2019–2024 рр.) [10].

На основі покадрових даних Sentinel-5P проаналізовано зміну аерозольного індексу (AER_AI) над Тернополем у літній період 2019–2024 рр. Кольорова шкала відображає рівень забруднення: чим вищі значення — тим інтенсивніше забруднення повітря.

У 2019–2021 рр. переважали стабільно низькі значення, що вказує на відносно чисте повітря. З 2022 р. фіксується зростання індексу, особливо у 2023–2024 рр., що може бути пов'язано з впливом військових дій, пожеж і збільшенням техногенних викидів.

Отже, після 2022 року спостерігається тенденція до зростання рівня аерозолів, що свідчить про посилення забруднення повітря під впливом зовнішніх кризових чинників.

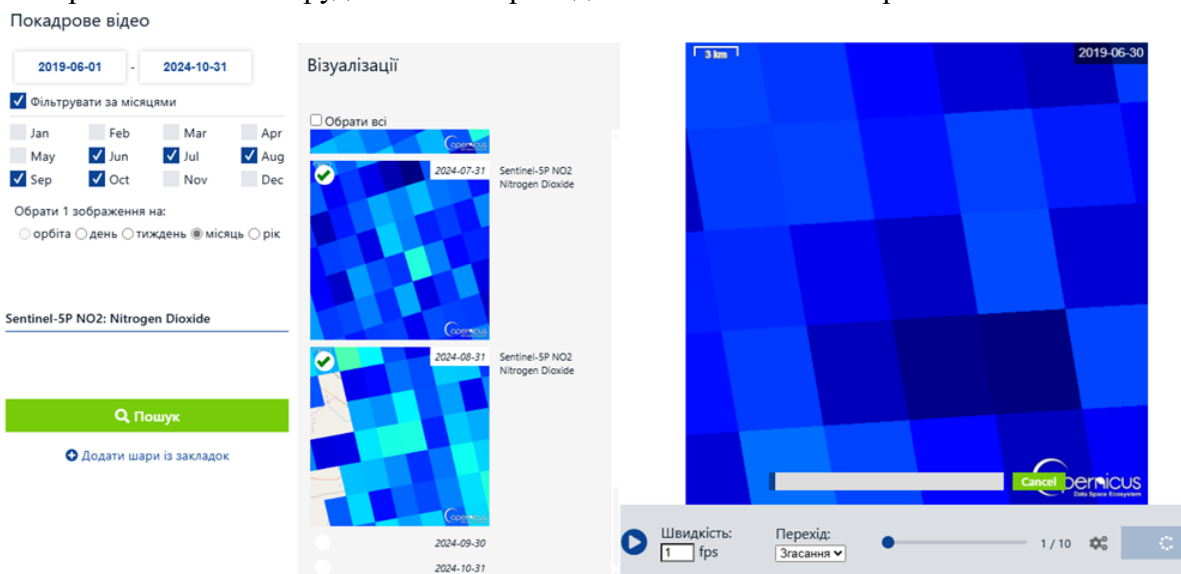


Рис. 5. Динаміка концентрації NO₂ за даними Sentinel-5P над Тернополем (2019–2024 рр.) [10].

Покадровий аналіз даних Sentinel-5P відображає сезонні та міжрічні зміни концентрації діоксиду азоту (NO_2) над Тернополем у 2019-2024 рр. Синя гама вказує на низький рівень забруднення, світліші відтінки – на його зростання.

У 2019 р. фіксувалися помірні рівні NO_2 . У 2020 р. – різке зниження, ймовірно через карантинні обмеження. У 2021 р. спостерігається часткове зростання, проте показники залишаються нижчими, ніж у 2019 р. Починаючи з 2022 р., концентрація NO_2 знижується, зокрема внаслідок змін економічної активності через війну. У 2024 р. відзначається незначне зростання, проте загальний рівень залишається низьким.

Протягом 2019-2024 рр. концентрація NO_2 в літні місяці знизилася, особливо після 2020 р., що свідчить про зменшення антропогенних викидів внаслідок соціально-економічних змін і воєнних дій.

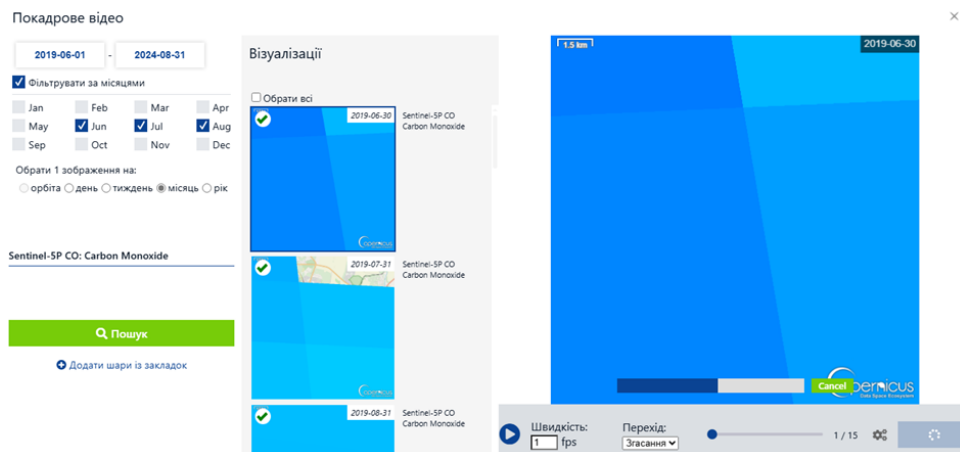


Рис. 6. Динаміка аерозольного індексу AER_AI над Тернополем за даними Sentinel-5P (2019-2024 рр.) [10].

На основі покадрових даних Sentinel-5P проаналізовано зміну аерозольного індексу (AER_AI) над Тернополем у літній період 2019-2024 рр. Кольорова шкала відображає рівень забруднення: чим вищі значення – тим інтенсивніше забруднення повітря.

У 2019-2021 рр. переважали стабільно низькі значення, що вказує на відносно чисте повітря. З 2022 р. фіксується зростання індексу, особливо у 2023-2024 рр., що може бути пов'язано з впливом військових дій, пожеж і збільшенням техногенних викидів.

Після 2022 року спостерігається тенденція до зростання рівня аерозолів, що свідчить про посилення забруднення повітря під впливом зовнішніх кризових чинників.

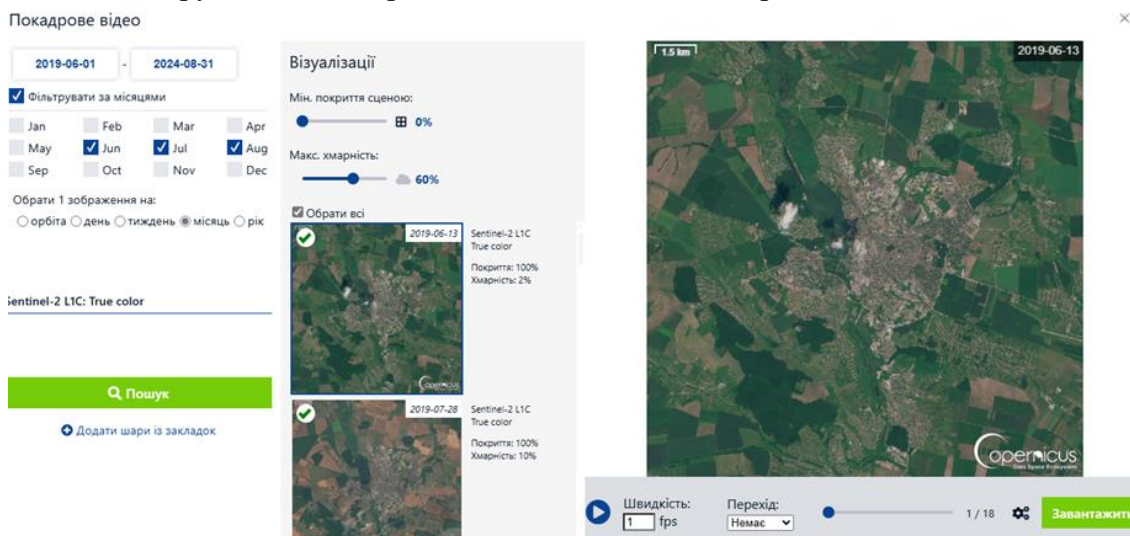


Рис. 7. Динаміка змін ландшафту Тернополя за знімками Sentinel-2 L1C (True Color, червень-серпень 2019-2024 рр.) [9].

Покадровий аналіз оптичних знімків Sentinel-2 (режим True Color) дозволяє простежити трансформацію території Тернополя в літній період 2019-2024 рр. Візуалізація у природних кольорах чітко відображає зміни у вегетаційному покриві, забудові та відкритих ділянках.

У динаміці простежується поступове скорочення зелених зон та зростання площ зі світлими відтінками, що відповідають забудові або відкритим ґрунтам. Особливо інтенсивні зміни фіксуються після 2021 року — періоду активного будівництва та урбаністичних перетворень.

Знімки Sentinel-2 свідчать про чітку тенденцію урбанізації: скорочення природного покриву та збільшення антропогенно змінених територій. Метод True Color забезпечує наочне документування просторових змін під впливом міського розвитку.

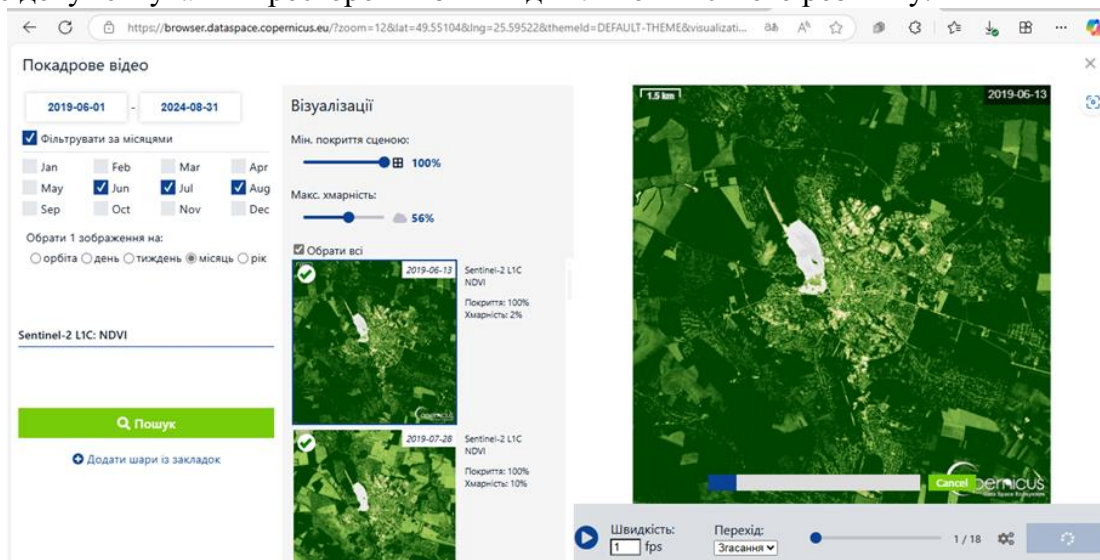


Рис. 8. Просторово-часова динаміка NDVI м. Тернополя за даними Sentinel-2 L1C (червень-серпень 2019-2024 рр.) [9].

Покадрове відео на основі індексу NDVI, розрахованого за даними Sentinel-2 L1C, дозволяє простежити сезонні зміни вегетації на території Тернополя у літній період 2019-2024 рр. Зелені відтінки відображають високі значення NDVI, що вказують на здорову рослинність, жовті та світло-коричневі – на її зниження або відсутність.

Протягом аналізованого періоду виявлено поступове зменшення площ із високим NDVI. Зокрема, починаючи з 2021 року спостерігається помітне поширення жовтуватих відтінків, що свідчить про деградацію рослинного покриву.

Зниження NDVI у літні місяці 2019-2024 рр. вказує на поступове зменшення зеленої біомаси у межах Тернополя. Причинами можуть бути інтенсивна урбанізація, зміни кліматичних умов або інші антропогенні чинники, що негативно впливають на стан вегетації.

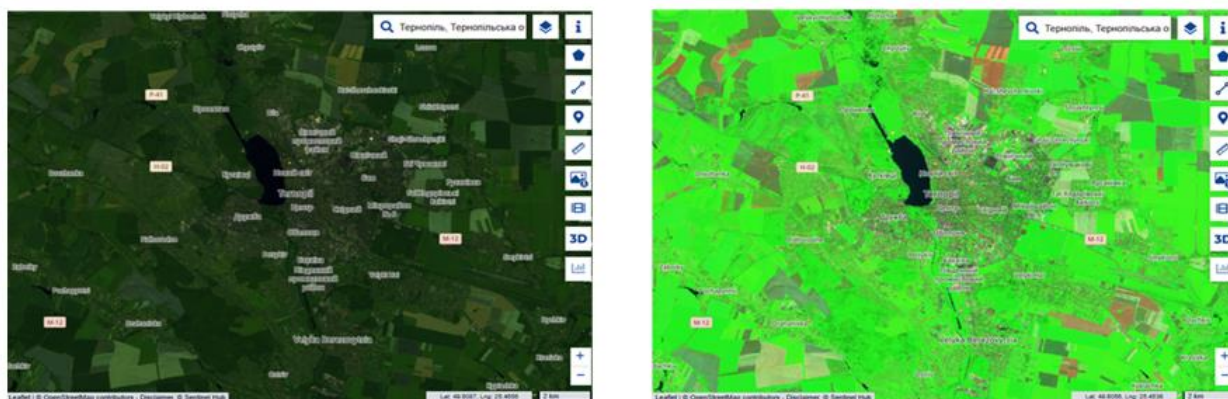


Рис. 9. Порівняння урбанізованої території Тернополя за композитами False Color (urban) та SWIR (Sentinel-2 L1C) [9].

На рисунку представлено порівняльний аналіз урбанізованої частини міста Тернополя за даними супутникової зйомки Sentinel-2 L1C із застосуванням двох спектральних композитів. Зліва – зображення у штучних кольорах (False Color urban), справа – композит, створений на основі короткохвильового інфрачервоного діапазону (SWIR).

Композит False Color (urban) чітко виокремлює забудовані території, відображаючи їх світлими відтінками, у той час як рослинність зображена у червоних тонах. Це дозволяє ефективно окреслити межі міської зони та оцінити рівень її озеленення. Водні об'єкти, зображені темними кольорами, легко ідентифікуються, що спрощує аналіз водних ресурсів.

Композит SWIR надає детальну інформацію про стан та густоту рослинності, використовуючи яскраві зелені відтінки, що дозволяє оцінити здоров'я зелених насаджень, зокрема в міських парках і прилеглих сільськогосподарських угіддях. Міська забудова у цьому композиті має різноманітні відтінки коричневого, залежно від матеріалів поверхонь (асфальт, бетон, покрівельні матеріали), що дозволяє виявити інфраструктурні характеристики та потенційні проблеми, пов'язані з урбаністичними змінами. Водні об'єкти також відображаються темними кольорами.

Порівняння композитів False Color та SWIR надає комплексну картину урбанізованої території Тернополя, дозволяючи не тільки візуалізувати розподіл забудови та рослинності, а й оцінити стан зелених насаджень і визначити особливості міських поверхонь. Використання цих композитів є важливим інструментом для моніторингу урбанізаційних процесів, екологічного стану міського середовища та підтримки сталого міського планування.

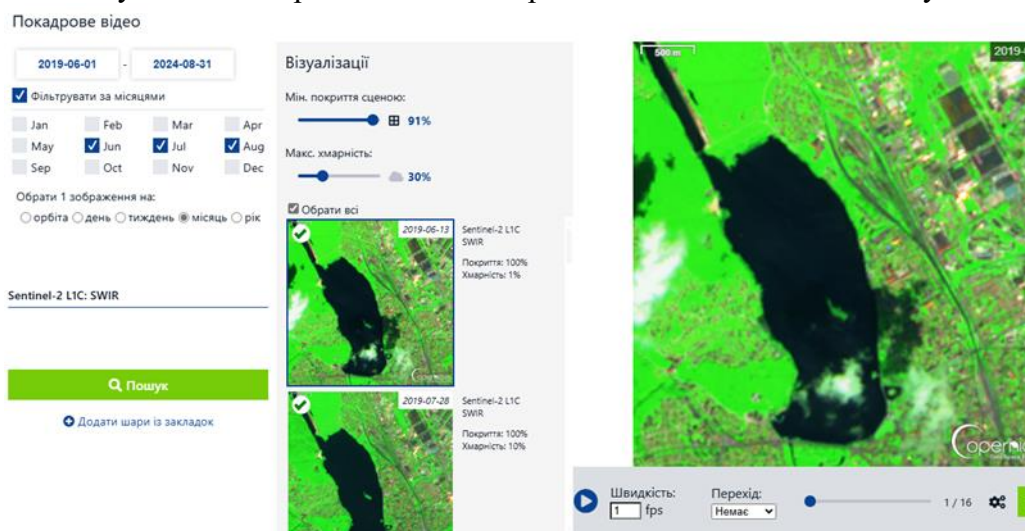


Рис. 10. Динаміка Тернопільського ставу за даними SWIR (2019-2024 рр.) [9].

На рисунку представлено аналіз динаміки водної екосистеми Тернопільського ставу за період 2019-2024 рр., виконаний за допомогою супутникових знімків у короткохвильовому інфрачервоному (SWIR) діапазоні.

Візуальний аналіз знімків SWIR демонструє, що площа водного дзеркала Тернопільського ставу залишалася стабільною протягом досліджуваного періоду. Помітних змін у розмірах водної поверхні не зафіксовано, що свідчить про відсутність значних коливань рівня води або змін гідрологічних умов.

Завдяки зеленим відтінкам на знімках, які відображають стан прибережної рослинності, можна оцінити сезонні зміни у розвитку та поширенні рослин. Порівняння знімків за різні роки дозволяє виявити зміни у поширенні зелених насаджень, що може свідчити про зміни в екологічних умовах навколо ставу.

Композит у SWIR діапазоні надає можливість оцінити зміни у вологовмісті прилеглих територій. Ці зміни можуть бути пов'язані з коливаннями гідрологічного режиму ставу або впливом антропогенних факторів, таких як забудова або зміна землекористування в околицях.

Аналіз знімків не виявив значних аномальних змін у відображенні водної поверхні, що

може свідчити про відсутність масштабних забруднень або суттєвих змін у каламутності води. Якщо б такі зміни відбулися, вони б виявлялися через різкі зміни у SWIR діапазоні.

Результати аналізу супутникових знімків показують, що площа водної поверхні Тернопільського ставу залишалася стабільною протягом 2019-2024 рр. Спостереження за прибережною рослинністю та вологовмістом навколишніх територій дозволяють оцінити стан екосистеми та можливі зміни, які можуть бути пов'язані з природними або антропогенними факторами. Відсутність значних змін у відображенні води у SWIR діапазоні свідчить про стабільність гідрологічного режиму та відсутність аномальних забруднень в екосистемі ставу.

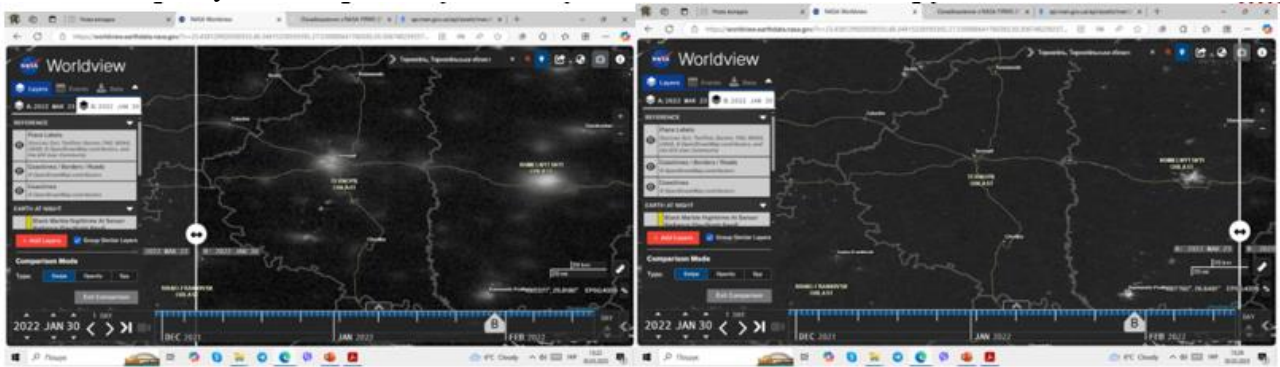


Рис. 11. Нічна освітленість у Тернополі до та після початку повномасштабної війни (за даними NASA Worldview, VIIRS/Suomi NPP) [6].

На рисунку показано порівняння нічної освітленості міста Тернополя до та після початку повномасштабного вторгнення Росії в Україну. Для аналізу використано дані Night Lights from NASA's Black Marble, отримані супутником VIIRS/Suomi NPP через платформу NASA Worldview.

Знімок, датований 30 січня 2022 року, демонструє типовий розподіл нічного освітлення, характерний для міської інфраструктури, транспортних артерій та рівня економічної активності. Яскравіші ділянки свідчать про вищу інтенсивність освітлення.

На зображенні, отриманому 30 березня 2025 року, помітно значне зменшення рівня нічної освітленості порівняно із ситуацією у 2022 році. Основними причинами таких змін можуть бути заходи світломаскування, зниження економічної активності, зміни в демографічному складі населення та пошкодження критичної інфраструктури.

Аналіз світлового забруднення на основі супутникових даних підтверджує загальне зниження рівня нічного освітлення у місті. Менша яскравість світлових потоків може мати позитивні наслідки, такі як зменшення негативного впливу на нічну фауну та оптимізація енергоспоживання. Водночас зниження освітлення може ускладнювати навігацію та створювати ризики для безпеки населення.

Використання даних VIIRS/Suomi NPP дає змогу кількісно оцінити ці зміни та провести глибший аналіз їхніх причин і потенційних наслідків для міського середовища.

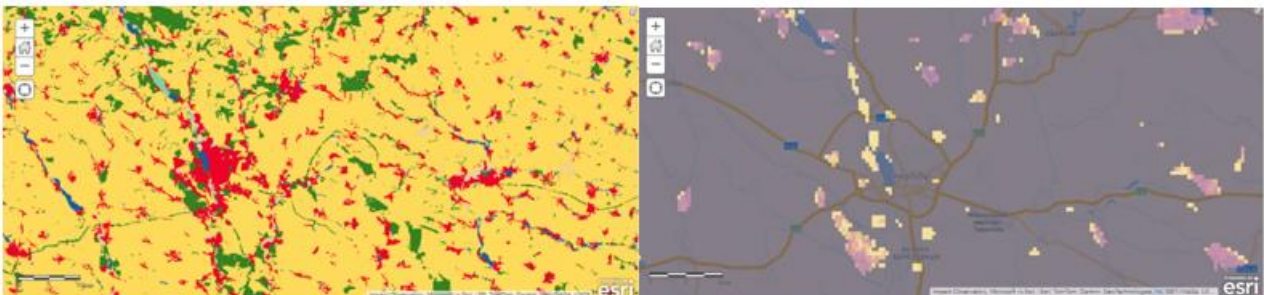


Рис. 12. Прогноз вразливості земної поверхні до змін (Land Cover Vulnerability to Change 2050) та динаміка забудованої території Тернополя (2019-2024 рр.)

На рисунку представлені два картографічні зображення, що ілюструють зміни земної поверхні в Тернополі, пов'язані з урбанізацією:

Космічний знімок Sentinel-2 (2019-2024 рр.): показує динаміку використання земель, де червоним кольором позначено забудовані території, зеленим – рослинність, жовтим – сільськогосподарські угіддя, синім – водні об'єкти. Проглядається розширення міської забудови.

Прогноз вразливості земної поверхні до змін (до 2050 року): карта демонструє прогноз потенційної вразливості різних типів земної поверхні до змін через кліматичні та антропогенні фактори. Зони з високою вразливістю потребують уваги при плануванні сталого розвитку.

Порівняння даних про динаміку урбанізації та прогнозів вразливості дозволяє оцінити тенденції та майбутні зміни в земному покриві Тернополя, що є важливим для сталого міського планування та природоохоронних заходів.

Висновки. Проведене дослідження просторово-часової динаміки якості повітря та води в умовах урбанізації Тернополя за даними дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) протягом 2019-2024 рр. дозволило отримати низку важливих висновків щодо екологічних наслідків розвитку міста.

Аналіз радарних даних Sentinel-1 засвідчив просторове зростання міської забудови, особливо в периферійних районах Тернополя, що є характерною ознакою інтенсивних урбанізаційних процесів. Паралельно, аналіз спектральних композитів Sentinel-2 (False Color та SWIR) підтвердив трансформацію земельного покриву, зокрема скорочення площ зелених насаджень у межах міської території та її околицях, що може мати негативний вплив на мікроклімат та екологічну стійкість.

Моніторинг атмосферного повітря за даними Sentinel-5P виявив загальну тенденцію до стабільно низьких рівнів концентрації чадного газу (CO) у літні місяці досліджуваного періоду. Однак, для отримання більш повної картини якості повітря, необхідний подальший аналіз інших атмосферних забруднювачів (NO₂, PM_{2.5}, O₃) та їхньої сезонної динаміки.

Дослідження стану водного об'єкта – Тернопільського ставу – за даними Sentinel-2 (індекси NDWI, MNDWI) вказало на наявність певних змін у його стані, що потребує більш детального вивчення для встановлення причинно-наслідкових зв'язків з урбанізаційними процесами та антропогенним навантаженням.

Застосування геоінформаційних технологій (ArcGIS Online) [1] забезпечило можливість виявлення просторово-часових патернів потенційного забруднення, що є важливим інструментом для ідентифікації зон екологічного ризику та розробки превентивних заходів. Оцінка впливу екстремальних подій (за даними NASA FIRMS) [5] підкреслила потенційний вплив термальних аномалій на екологічний стан міста.

Узагальнюючи, результати проведеного просторово-часового аналізу свідчать про існування екологічних змін у Тернополі, пов'язаних з урбанізаційним розвитком. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на кількісну оцінку впливу виявлених тенденцій на різні компоненти міського середовища, здоров'я населення та розробку науково обґрунтованих рекомендацій для сталого міського планування та екологічної політики. Застосування комплексного підходу до моніторингу довкілля з використанням даних ДЗЗ та ГІС є перспективним напрямком для забезпечення екологічної безпеки та сталого розвитку міських територій України.

Список використаних джерел:

1. ArcGIS Online. <http://www.arcgis.com/home/>.
2. Bauwens M. et al. (2020). Impact of coronavirus outbreak on NO₂ pollution assessed using TROPOMI and OMI observations. Remote Sensing, 12(10), 3575. <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/10/3575>.
3. Giordano F. et al. (2022). Satellite NO₂ data validation using multi-site observations. ISPRS Archives, XLVI-M-1-2022. <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLVI-M-1-2022/205/2022/>.
4. Google Earth. <http://www.google.com/earth/index.html>.

5. NASA FIRMS. <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>.
6. NASA Worldview. <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>.
7. Savinets M. et al. (2020). Air pollution in Ukraine: a view from the Sentinel-5P satellite. Academia.edu. <https://www.academia.edu/102932726>.
8. Sentinel-1 Mission. <https://sentinewiki.copernicus.eu/web/sentinel-1>.
9. Sentinel-2 Mission. <https://sentinewiki.copernicus.eu/web/s2-mission>.
10. Sentinel-5P. ESA missions. Available at: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p>.
11. Verhoelst T. et al. (2021). Validation of TROPOMI NO₂ measurements using ground-based networks. Atmospheric Measurement Techniques. <https://amt.copernicus.org/articles/14/481/2021/>.
12. Кириченко О. І. (2020). Застосування NDWI для аналізу прибережних зон Одеської затоки. Архів морських досліджень. <http://archive.mcnd.org.ua/article/view/odessa-ndwi>.
13. Савенець М., Дворецька І. (2019). Оцінка забруднення атмосфери України за даними Sentinel-5P. Наукова періодика ХНУ ім. Каразіна. <https://periodicals.karazin.ua/geoeco/article/view/15302>.
14. Тернопіль – Карти Google. <https://www.google.com/maps/place>.

ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ЛІСОГОСПОДАРСЬКОГО ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ В РЕГІОНІ

Павло ФЛІНТА

Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка
Тернопіль, Україна

Abstract. *The article examines current issues of forest land use in the region and substantiates directions for its improvement. The main ecological, economic, and legal aspects of forest land management are analyzed. Special attention is paid to the use of modern technologies, institutional changes, and the involvement of local communities in the management of forest resources. Practical recommendations are proposed to ensure the sustainable development of forestry in the context of climate challenges and Ukraine's course toward European integration.*

Keywords: *forest land use, forest resources, sustainable development, environmental security, digital technologies, forest policy.*

Ліси відіграють ключову роль у забезпеченні екологічної стабільності, регуляції клімату та збереженні біорізноманіття. Водночас ефективне лісогосподарське землекористування є необхідною умовою для сталого природокористування. Україна, володіючи значним лісовим потенціалом, стикається з рядом викликів, серед яких – нераціональне використання земель, незаконні рубки, деградація лісів та недостатній рівень інституційної підтримки.

В умовах посилення екологічних порушень у лісовій сфері необхідно застосовувати адаптивні підходи до управління лісами, які б враховували всі рушійні сили та обмежувальні фактори. Тобто, зміни екологічного та соціально-економічного характеру в лісогосподарському землекористуванні потребують вивчення показників у динаміці, з урахуванням їхньої реакції на вплив різних факторів і взаємозв'язків. Інтенсивність і напрямок цих змін вимагають постійної оцінки та аналізу впливу управлінських рішень на регіональний лісовий сектор.

Незважаючи на те, що значна кількість досліджень спрямована на активізацію позитивних чинників та пом'якшення негативних наслідків лісогосподарського землекористування, проблема забезпечення збалансованого лісогосподарського землекористування залишається актуальною. Це обумовлює необхідність подальших досліджень щодо вдосконалення інструментів управління, які створюватимуть наукову основу для досягнення цілей екологічної політики на регіональному рівні. Метою дослідження є визначення напрямів удосконалення управління землями лісогосподарського призначення, враховуючи баланс екологічних і соціально-економічних аспектів лісогосподарського землекористування.