

Національний університет «Львівська політехніка»

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

ПЕТРИК ЮЛІЯ ВАЛЕРІЇВНА

УДК 528.8:630\*9(477)

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**МОНІТОРИНГ СТАНУ ХВОЙНИХ ЛІСІВ ПРИКАРПАТСЬКОГО**  
**РЕГІОНУ ЗА КОСМІЧНИМИ ЗНІМКАМИ**

193 Геодезія та землеустрій  
*(шифр і назва спеціальності)*

19 Архітектура та будівництво  
*(галузь знань)*

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ *Петрик Ю. В.*

Науковий керівник Бурштинська Христина Василівна, д.т.н., професор

ЛЬВІВ – 2024

## АНОТАЦІЯ

*Петрик Ю. В.* Моніторинг стану хвойних лісів Прикарпатського регіону за космічними знімками. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 193 *Геодезія та землеустрій* (19 *Архітектура та будівництво*). - Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2024.

Ліси є одними із найважливіших природних ресурсів, що виконують ключові екологічні, економічні та соціальні функції. Вони забезпечують регулювання водного балансу, захист ґрунтів від ерозії, підтримку біорізноманіття та відіграють важливу роль у поглинанні вуглекислого газу, що сприяє зменшенню наслідків змін клімату. Однак останніми десятиліттями спостерігається значне погіршення стану лісових екосистем, зокрема хвойних лісів Прикарпатського регіону, що пов'язано як із природними, так і з антропогенними факторами.

Однією з найактуальніших проблем є засихання лісів, що спричинене змінами клімату, коливанням рівня ґрунтових вод, впливом шкідників та патогенних мікроорганізмів, а також вирубкою і забрудненням довкілля. З огляду на це постає необхідність ефективного моніторингу лісових екосистем для своєчасного виявлення негативних тенденцій, оцінки динаміки змін у стані лісових масивів та розробки заходів для їхньої охорони та відновлення.

Сучасні методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та геоінформаційних систем (ГІС) відкривають нові можливості для контролю стану лісових насаджень та дозволяють отримувати високоточні дані про зміни у структурі рослинного покриву. Використання супутникових знімків у поєднанні з наземними дослідженнями сприяє своєчасному виявленню деградованих територій, оцінюванню лісових деревостанів та прогнозуванню і подальшому розвитку лісових екосистем. Інтеграція цих технологій у

систему управління лісовими ресурсами сприяє утвердженню науково обґрунтованих рішень щодо їхнього збереження та сталого розвитку.

Дослідження, подане у цій роботі, спрямоване на аналіз сучасних технологій моніторингу лісів Прикарпатського регіону з використанням методів дистанційного зондування, ГІС-аналізу та визначення спектральних характеристик хвойних насаджень.

Перший розділ дослідження присвячено сучасним технологіям моніторингу стану лісів Прикарпатського регіону. Зокрема, розглянуто загальну характеристику лісів України, їхнє екологічне значення та основні нормативно-правові документи, що регулюють управління лісовим господарством. Визначено ключові нормативні документи, такі як Лісовий кодекс України та державні програми з охорони лісів, що впливають на формування політики у сфері лісокористування.

Проаналізовано літературні джерела, що висвітлюють актуальні дослідження у сфері моніторингу лісових масивів, зокрема традиційні методи, як наприклад, лісова таксація та сучасні методи з використанням даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та геоінформаційних систем (ГІС).

Детально розглянуто основні причини засихання лісів, серед яких природні чинники (кліматичні зміни, посухи, зниження рівня ґрунтових вод) та антропогенні чинники (вирубка лісів, забруднення довкілля, діяльність шкідників та патогенних мікроорганізмів). На підставі проведеного аналізу підтверджено, що деградація хвойних лісів є комплексною проблемою, яка вимагає застосування сучасних технологій моніторингу для своєчасного виявлення загроз і розробки ефективних заходів збереження лісових екосистем.

У другому розділі розглянуто теоретичні засади моніторингу, які базуються на спектральних характеристиках зображень об'єктів земної поверхні, отриманих з використанням даних дистанційного зондування Землі та їх перетворенням за допомогою геоінформаційних систем. Сформовано

структурну схему досліджень, яка складається з трьох основних етапів: польових досліджень, аерознімання за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та камеральних робіт. Особливу увагу надано вивченню спектральних характеристик хвойної рослинності, які є важливими показниками стану деревного покриву. Проведено спектрофотометрування хвойної рослинності різного типу засихання. Використання спектральних відображень у різних діапазонах електромагнітного спектра дозволяє виявляти зміни у структурі лісового масиву, зокрема на ранніх стадіях засихання насаджень. Розглянуто основні типи вегетаційних індексів, а саме базові, стійкі до впливу атмосфери, стійні до впливу ґрунту, індекси для оцінювання вмісту вологи у рослинному покриві тощо.

Окремо розглянуто теоретичні аспекти контрольованої класифікації лісових масивів, на підставі якої автоматизовано аналізують багатоспектральні зображення для визначення змін у структурі лісового покриву. Проведено дослідження ефективності таких статистичних методів розділення класів як евклідова відстань, дивергенція, трансформована дивергенція та відстань Джефріса-Матусіти на основі супутникового знімка лісового масиву, отриманого з космічного апарата QuickBird (червень 2010 року), що дозволило визначити оптимальну кількість класів для тематичної класифікації.

Дослідження статистичних методів розділення класів включало аналіз евклідової відстані, дивергенції, трансформованої дивергенції та відстані Джефріса-Матусіти. За результатами класифікації встановлено, що найефективнішим методом для класифікації хвойних лісів є метод трансформованої дивергенції, оскільки він забезпечує найточніше розмежування класів лісового покриву.

Результати дослідження підтверджують, що використання спектральних характеристик у поєднанні з методами дистанційного зондування та геоінформаційних технологій є ефективним інструментом для моніторингу хвойних лісів. Отримані дані можуть бути використані для оцінки стану

лісових екосистем, розробки заходів із їхнього збереження та прийняття рішень щодо раціонального лісокористування.

Третій розділ дослідження присвячено експериментальним роботам із моніторингу стану хвойних лісів Прикарпатського регіону. Для оцінки динаміки змін лісового покриву досліджено Тухлянське лісництво, де застосовано комплексну методику аналізу, що включає контрольовану класифікацію супутникових знімків, розрахунок вегетаційних індексів, аналіз багатоспектральних зображень і використання даних, отриманих із безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Для дослідження змін лісових територій використано космічні знімки із супутників Landsat 5 (2007 р.), GeoEye (2011), Sentinel-2 (2017, 2018 рр.) та PlanetScope (2017, 2022 рр.). Навчальні вибірки для класифікації створено за результатами польових обстежень та ортофотопланів. Отримані дані дозволили оцінити масштаб деградації хвойних насаджень, виявити нові зони засихання та простежити тенденції змін лісового покриву в досліджуваній місцевості.

Розраховано вегетаційні індекси NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), WDRVI (Wide Dynamic Range Vegetation Index) та PSRI (Plant Senescence Reflectance Index), які вибрано на основі даних спектрофотометрування для виявлення пошкодженої рослинності. Використання цих індексів дозволило підвищити точність виявлення зон із деградованою рослинністю та сприяло покращенню класифікаційних результатів.

Значну увагу надано оцінці точності методів класифікації. Аналіз результатів показав, що класифікація за композиційним індексним зображенням має вищу достовірність (87–98%) у порівнянні з класифікацією за синтезованими супутниковими зображеннями (76–96%). Це свідчить про високу ефективність використання вегетаційних індексів для ідентифікації змін у лісових насадженнях.

На основі аналізу супутникових знімків на території лісництва площею 4860 га за період 2007–2017 років встановлено, що загальна площа засихання дерев за 10 років збільшилася у 1,9 разів. Унаслідок активної вирубки засохлих дерев у 2017–2018 рр. додатково зафіксовано 52,2 га змінених лісових територій.

Отримані результати підтверджують високу ефективність використання супутникових знімків і БПЛА для моніторингу лісових масивів. Дистанційне зондування у поєднанні з наземними спостереженнями дозволяє не лише оперативно виявляти зміни у рослинному покриві, але й прогнозувати майбутні тенденції у розвитку лісових екосистем.

*Ключові слова:* моніторинг лісів, засихання хвойних лісів, космічні знімки, дистанційне зондування Землі, контрольована класифікація, навчальні вибірки, роздільність класів, спектрофотометрування, спектральні криві, вегетаційні індекси, геоінформаційні системи.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті у наукових періодичних виданнях України, які включено до міжнародних наукометричних баз

1. Бурштинська, Х., Денис, Ю., Поліщук, Б., & Тимчишин М. (2018). Моніторинг лісових пожеж за космічними знімками середнього розрізнення. *Збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК «Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва»*, Випуск I (35), с. 179-184. [www.doi.org/10.33841/1819-1339-2018-1-35](http://www.doi.org/10.33841/1819-1339-2018-1-35) ( Index Copernicus).
2. Денис, Ю., Бурштинська, Х., & Паштетник, О. (2019). Моніторинг засихання хвойних лісів за різночасовими космічними знімками (на прикладі Тухлянського лісництва). *Збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК «Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва»*, Випуск I (37), с. 78-84. [www.doi.org/10.33841/1819-1339-2019-1-37-78-84](http://www.doi.org/10.33841/1819-1339-2019-1-37-78-84) (Index Copernicus).
3. Burshtynska, Kh., Petryk, Yu., Polishchuk, B., & Shylo Ye. (2019). Monitoring of coniferous forest drying in Precarpathian region using remote sensing data. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography. Volume 90*, pp. 29-40. <https://doi.org/10.23939/istcgcap2019.90.029> (Index Copernicus).

### Статті у наукових періодичних виданнях іншої держави, які включено до міжнародних наукометричних баз

4. Babushka, A., Burshtynska, Kh., & Denys, Yu. (2017). Classification of forests in the Precarpathian region using QuickBird-2 high resolution satellite image. *Geomatics, Landmanagement and Landscape, No. 2*, pp. 7-19. DOI: 10.15576/GLL/2017.2.7 (Index Copernicus).

### Статті у наукових фахових виданнях України

5. Бурштинська, Х., Денис, Ю., Мадяр, Ю., & Поліщук, Б. (2016). Методика двоетапної класифікації лісів за космічними зображеннями високого розрізнення. *Збірник наукових праць Західного геодезичного товариства*

УТГК «Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва», Випуск 1 (31), с. 148-155.

6. Денис Ю. (2017). Дослідження ефективності методів розділення класів при класифікації лісів. *Збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК «Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва»*, Випуск II (34), с. 114-118.

7. Петрик, Ю., Бурштинська, Х., & Поліщук, Б. (2024). Дослідження стану лісів Прикарпатського регіону за космічними зображеннями з використанням методу контрольованої класифікації. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, Випуск I (47), с. 179-185 [www.doi.org/10.33841/1819-1339-1-47-179-185](http://www.doi.org/10.33841/1819-1339-1-47-179-185)

**Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації, а саме матеріали та тези міжнародних і вітчизняних науково-технічних та наукових конференцій**

8. Бурштинська, Х., Бабушка, А., Поліщук, Б., & Денис, Ю. (2017). Методика класифікації лісів за космічними зображеннями високого розрізнення. *Матеріали 8-мої міжнародної науково-технічної конференції: «Моніторинг довкілля, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології та перспективи розвитку»*, Львів - Східниця, с. 95 – 98.

9. Денис, Ю., Паштетник, О., & Поліщук, Б. (2017). Дослідження стану хвойних лісів Прикарпатського регіону з використанням космічних знімків. *Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених «GeoTerrace-2017»*, Львів: Видавництво Львівської політехніки, с.130-133.

10. Денис, Ю., Паштетник, О., & Поліщук, Б. (2018). Моніторинг засихання хвойних лісів з використанням космічних знімків (на прикладі Тухлянського лісництва). *Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених «GeoTerrace-2018»*, Львів: Видавництво Львівської політехніки, с. 182-183.



11. Денис, Ю., Бурштинська, Х., & Поліщук, Б. (2019). Моніторинг засихання хвойних лісів за різночасовими космічними знімками. *Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції «Геофорум-2019»*, Львів: Видавництво Львівської політехніки, с. 25-26.
12. Burshtynska, K., Denys, Yu., & Polishchuk, B. (2019). Monitoring of coniferous forest drying in Precarpathian region using remote sensing data. *Book of abstract of XI International scientific-technical conference «Environmental engineering, photogrammetry, geoinformatics: modern technologies and development perspectives»*, Lublin, Poland, pp. 40-41.
13. Бурштинська, Х., & Петрик, Ю. (2023). Моніторинг стану хвойних лісів за матеріалами космічних знімків із сузір'я наносупутників PlanetScore. *Матеріали 10-мої міжнародної науково-технічної конференції: «Моніторинг довкілля, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології та перспективи розвитку»*, Львів, с. 20.

## ABSTRACT

*Petryk Yu. V.* Monitoring of the condition of coniferous forests in the Precarpathian region using satellite images. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) on specialty 193 *Geodesy and Land Management (19 Architecture and Construction)* – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2024.

Forests are among the most important natural resources, performing key ecological, economic, and social functions. They regulate the water balance, protect soils from erosion, support biodiversity, and play a crucial role in absorbing carbon dioxide, helping to mitigate the effects of climate change. However, in recent decades, there has been a significant deterioration in forest ecosystems, particularly in the coniferous forests of the Prykarpattia region, due to both natural and anthropogenic factors.

One of the most pressing issues is forest drying, caused by climate change, fluctuations in groundwater levels, the impact of pests and pathogenic microorganisms, as well as deforestation and environmental pollution. Given this, there is a growing need for effective monitoring of forest ecosystems to timely detect negative trends, assess the dynamics of changes in forest conditions, and develop measures for their protection and restoration.

Modern remote sensing (RS) methods and geographic information systems (GIS) open new possibilities for monitoring the condition of forest plantations and allow for the acquisition of high-precision data on changes in vegetation cover structure. The use of satellite imagery combined with field research facilitates the timely detection of degraded areas, the assessment of forest stands, and the forecasting of further developments in forest ecosystems. The integration of these technologies into the forest resource management system contributes to the adoption of scientifically grounded decisions regarding their conservation and sustainable development.

The research presented in this study focuses on analyzing modern forest monitoring technologies in the Prykarpattia region using remote sensing methods, GIS analysis, and the determination of the spectral characteristics of coniferous stands.

The first section of the study is dedicated to modern technologies for monitoring forest conditions in the Prykarpattia region. In particular, it examines the general characteristics of Ukraine's forests, their ecological significance, and key regulatory and legal documents governing forest management. The study identifies essential normative documents, such as the Forest Code of Ukraine and state forest protection programs, which influence policymaking in the field of forestry.

A review of the literature highlights current research on forest monitoring, including traditional methods such as forest inventory and modern techniques involving remote sensing (RS) data and geographic information systems (GIS).

The study provides a detailed examination of the primary causes of forest drying, including natural factors (climate change, droughts, and groundwater level decline) and anthropogenic factors (deforestation, environmental pollution, and the activity of pests and pathogenic microorganisms). Based on the analysis, it is confirmed that the degradation of coniferous forests is a complex issue requiring the application of modern monitoring technologies for the timely detection of threats and the development of effective measures for the conservation of forest ecosystems.

The second section examines the theoretical foundations of monitoring, which are based on the spectral characteristics of images of Earth's surface objects obtained using remote sensing (RS) data and processed through geographic information systems (GIS). A structured research framework has been developed, consisting of three main stages: field studies, aerial imaging using unmanned aerial vehicles (UAVs), and laboratory analysis. Particular attention is given to the study of the spectral characteristics of coniferous vegetation, which serve as important indicators of forest canopy health. Spectrophotometric analysis

of coniferous vegetation at different stages of drying was conducted. The use of spectral reflections in various ranges of the electromagnetic spectrum enables the detection of changes in forest structure, particularly in the early stages of tree decline. The study examines key types of vegetation indices, including basic indices, those resistant to atmospheric influence, soil-resistant indices, and indices for assessing moisture content in vegetation cover.

The theoretical aspects of supervised classification of forested areas are also explored, forming the basis for automated analysis of multispectral images to detect changes in forest cover structure. A study was conducted on the effectiveness of statistical classification methods, including Euclidean distance, divergence, transformed divergence, and the Jeffries-Matusita distance, based on a satellite image of a forest area obtained from the QuickBird satellite (June 2010). This analysis helped determine the optimal number of classes for thematic classification.

The statistical methods for class separation were analyzed, and classification results confirmed that the transformed divergence method is the most effective for classifying coniferous forests, as it provides the highest accuracy in distinguishing forest cover classes.

The findings confirm that the use of spectral characteristics combined with remote sensing and GIS technologies is an effective tool for monitoring coniferous forests. The obtained data can be used for assessing forest ecosystem conditions, developing conservation measures, and making informed decisions on sustainable forest management.

The third section of the study focuses on experimental work related to monitoring the condition of coniferous forests in the Prykarpattia region. To assess the dynamics of forest cover changes, the Tukhlianske forestry area was examined using a comprehensive methodology that includes supervised classification of satellite images, vegetation index calculations, multispectral image analysis, and data from unmanned aerial vehicles (UAVs).

To investigate changes in forested areas, satellite images from Landsat 5 (2007), GeoEye (2011), Sentinel-2 (2017, 2018), and PlanetScope (2017, 2022) were used. Training datasets for classification were created based on field surveys and orthophoto maps. The collected data enabled an assessment of the scale of coniferous forest degradation, identification of new drying zones, and analysis of forest cover change trends in the studied area.

Vegetation indices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), WDRVI (Wide Dynamic Range Vegetation Index), and PSRI (Plant Senescence Reflectance Index) were calculated, selected based on spectrophotometric data to detect damaged vegetation. The use of these indices improved the accuracy of identifying degraded vegetation zones and enhanced classification results.

A significant focus was placed on evaluating classification accuracy. The results showed that classification based on composite index imagery had higher reliability (87–98%) compared to classification using synthesized satellite images (76–96%). This highlights the high efficiency of vegetation indices in detecting forest cover changes.

An analysis of satellite images of a 4,860-hectare forestry area over the period 2007–2017 revealed that the total area of tree drying increased 1.9 times over ten years. Due to active logging of dried trees in 2017–2018, an additional 52.2 hectares of altered forested areas were recorded.

The obtained results confirm the high efficiency of using satellite imagery and UAVs for forest monitoring. Remote sensing, combined with ground observations, allows not only for the timely detection of vegetation cover changes but also for predicting future trends in forest ecosystem development.

*Keywords:* forest monitoring, coniferous forest drying, satellite images, remote sensing, supervised classification, training samples, class separability, spectrophotometry, spectral curves, vegetation indices, geographic information systems.

## **THE RESEARCHER LIST OF PUBLICATIONS WHICH CONTAIN THE MAIN SCIENTIFIC RESULTS OF THIS DISSERTATION**

### **Publications in scientific editions of Ukraine, which are included in international science-computer databases**

- 1) Burshtynska, Kh., Denys, Yu., Polishchuk, B., & Tymchyshyn, M. (2018). Monitoring of Forest Fires Using Medium-Resolution Satellite Images. *Modern Achievements of Geodetic Science and Production, Issue I (35)*, pp. 179–184. [www.doi.org/10.33841/1819-1339-2018-1-35](http://www.doi.org/10.33841/1819-1339-2018-1-35) (Index Copernicus).
- 2) Denys, Yu., Burshtynska, Kh., & Pashtetnyk, O. (2019). Monitoring of Coniferous Forest Drying Using Multi-Temporal Satellite Images (Case Study of Tukhlianske Forestry). *Modern Achievements of Geodetic Science and Production, Issue I (37)*, pp. 78–84. [www.doi.org/10.33841/1819-1339-2019-1-37-78-84](http://www.doi.org/10.33841/1819-1339-2019-1-37-78-84) (Index Copernicus).
- 3) Burshtynska, Kh., Petryk, Yu., Polishchuk, B., & Shylo, Ye. (2019). Monitoring of Coniferous Forest Drying in the Precarpathian Region Using Remote Sensing Data. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography, Volume 90*, pp. 29–40. <https://doi.org/10.23939/istcgcap2019.90.029> (Index Copernicus).

### **Publications in scientific editions of other countries**

- 4) Babushka, A., Burshtynska, Kh., & Denys, Yu. (2017). Classification of Forests in the Precarpathian Region Using QuickBird-2 High-Resolution Satellite Images. *Geomatics, Landmanagement and Landscape, No. 2*, pp. 7–19. (Index Copernicus).

### **Publications in scientific editions of other countries, which are included in international science-computer databases**

- 5) Burshtynska, Kh., Denys, Yu., Madyar, Yu., & Polishchuk, B. (2016). Methodology for Two-Stage Forest Classification Using High-Resolution Satellite Images. *Collection of Scientific Papers of the Western Geodetic Society of UTGK "Modern Achievements of Geodetic Science and Production," Issue 1 (31)*, pp. 148–155.

6) Denys, Yu. (2017). Study of the Efficiency of Class Separation Methods in Forest Classification. *Collection of Scientific Papers of the Western Geodetic Society of UTGK "Modern Achievements of Geodetic Science and Production,"* Issue II (34), pp. 114–118.

7) Petryk, Yu., Burshtynska, Kh., & Polishchuk, B. (2024). Study of Forest Condition in the Precarpathian Region Using Satellite Images and Supervised Classification Method. *Modern Achievements of Geodetic Science and Production, Issue I (47)*, pp. 179–185. [www.doi.org/10.33841/1819-1339-1-47-179-185](http://www.doi.org/10.33841/1819-1339-1-47-179-185).

**Publications that testify to the approbation of the dissertation materials,  
namely the materials and abstracts of international and national scientific  
and technical conferences**

8) Burshtynska, Kh., Babushka, A., Polishchuk, B., & Denys, Yu. (2017). Methodology for Forest Classification Using High-Resolution Satellite Images. *Proceedings of the 8th International Scientific and Technical Conference: "Environmental Monitoring, Photogrammetry, Geoinformatics – Modern Technologies and Development Prospects"*, Lviv - Skhidnytsia, pp. 95–98.

9) Denys, Yu., Pashtetnyk, O., & Polishchuk, B. (2017). Study of the Condition of Coniferous Forests in the Precarpathian Region Using Satellite Images. *Proceedings of Materials from the International Scientific and Technical Conference of Young Scientists "GeoTerrace-2017"*, Lviv, pp. 130–133.

10) Denys, Yu., Pashtetnyk, O., & Polishchuk, B. (2018). Monitoring of Coniferous Forest Drying Using Satellite Images (Case Study of Tukhlianske Forestry). *Proceedings of the International Scientific-Practical Conference of Young Scientists "GeoTerrace-2018"*, Lviv, pp. 182–183.

11) Denys, Yu., Burshtynska, Kh., & Polishchuk, B. (2019). Monitoring of Coniferous Forest Drying Using Multi-Temporal Satellite Images. *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Geoforum-2019"*, Lviv, pp. 25–26.

- 12) Burshtynska, K., Denys, Yu., & Polishchuk, B. (2019). Monitoring of Coniferous Forest Drying in the Precarpathian Region Using Remote Sensing Data. *Proceedings of the XI International Scientific-Technical Conference "Environmental Engineering, Photogrammetry, Geoinformatics: Modern Technologies and Development Perspectives"*, Lublin, Poland, pp. 40–41.
- 13) Burshtynska, Kh., & Petryk, Yu. (2023). Monitoring of the Condition of Coniferous Forests Using Satellite Images from the PlanetScope Nanosatellite Constellation. *Proceedings of the 10th International Scientific and Technical Conference: "Environmental Monitoring, Photogrammetry, Geoinformatics – Modern Technologies and Development Prospects"*, Lviv, p. 20.



## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	19
ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ МОНІТОРИНГУ ЛІСІВ ПРИКАРПАТСЬКОГО РЕГІОНУ .....	28
1.1. Загальна характеристика лісів України .....	28
1.2. Аналіз літературних джерел стосовно дослідження стану лісів.....	42
1.3. Основні причини засихання лісів.....	51
1.4. Висновки до розділу 1 .....	60
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІСОВИХ УТВОРЕНЬ ЗА СПЕКТРАЛЬНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ.....	62
2.1. Загальна технологічна схема визначення стану лісів з застосуванням технологій ГІС та ДЗЗ.....	62
2.2. Визначення спектральних характеристик хвойної рослинності .....	63
2.3. Застосування вегетаційних індексів для ідентифікації хвойних лісів... 74	
2.3. Теоретичні аспекти контрольованої класифікації .....	83
2.3.1. Статистичні методи розділення класів для контрольованої класифікації .....	83
2.3.2. Контрольована класифікація .....	90
2.4. Висновки до розділу 2 .....	94
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РОБОТИ З МОНІТОРИНГУ ЗАСИХАННЯ ХВОЙНИХ ЛІСІВ ПРИКАРПАТТЯ .....	95
3.1. Характеристика об'єкта дослідження .....	95
3.2. Польові дослідження стану лісів Прикарпатського регіону .....	101
3.3. Знімання з БПЛА для вибору тестових ділянок .....	105
3.4. Використання вегетаційних індексів для виявлення пошкодженої рослинності.....	108
3.5. Контрольована класифікація.....	114
3.5.1. Моніторинг стану лісів за різночасовими космічними знімками.. 114	
3.5.2. Дослідження стану хвойних масивів за матеріалами космічних знімків із супутників PlanetScope.....	121

3.6. Висновки до розділу 3 .....	127
ВИСНОВКИ.....	129
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	130
ДОДАТОК А.....	145

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

БПЛА	Безпілотний літальний апарат
ГІС	Геоінформаційні системи
ДЗЗ	Дистанційне зондування Землі
ДП	Державне підприємство
СКП	Середня квадратична похибка
ЦМР	Цифрова модель рельєфу
ФАО	Продовольча та сільськогосподарська організація ООН
WWF	World Wide Fund for Nature

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Хвойні ліси відіграють надзвичайно важливу роль в екологічній стабільності, регулюванні водного балансу, збереженні біорізноманіття та є критичним елементом для сталого розвитку економіки, місцевого населення і туризму. Проте сьогодні хвойні насадження перебувають під постійним впливом численних чинників, таких як зміни клімату, поширення шкідників і хвороб, лісові пожежі, що зростають як у частоті, так і в масштабах, а також антропогенне навантаження, викликане лісокористуванням та рекреаційною діяльністю.

Важливість застосування супутникових знімків у дослідженні стану лісів зумовлена низкою їхніх переваг перед традиційними методами наземного моніторингу. Космічні знімки дають можливість ефективно та швидко отримувати дані про великі території, незалежно від складності доступу до них. Сучасні методи дистанційного зондування (ДЗЗ) забезпечують високу точність розпізнавання змін у лісових масивах і дозволяють фіксувати різкі зміни у стані насаджень, зокрема виявляти пошкоджені ділянки на ранніх етапах деградації. Такий підхід надає можливість точного визначення стану крон дерев, рівня їх дефоліації, зміни в структурі та густоті насаджень, а також відстеження впливу шкідників і хвороб.

Особливого значення набуває моніторинг хвойних лісів, які найбільше потерпають від зміни кліматичних умов. Підвищення середніх температур, нестабільні режими опадів і коливання рівня ґрунтових вод стають сприятливими умовами для розповсюдження шкідників (наприклад, короїдів) та захворювань, що вражають насадження, ослаблені внаслідок стресу від кліматичних змін. Швидке виявлення таких осередків пошкоджень за допомогою супутникових даних дозволяє ефективніше планувати заходи з охорони та збереження лісів, зокрема проведення санітарних рубок, обробку уражених зон та відновлення лісів.

Прикарпатський регіон є особливо вразливим до впливу кліматичних змін через своє географічне розташування і складний гірський рельєф, що ускладнює проведення наземного моніторингу. Використання даних ДЗЗ дозволяє фіксувати зміни у лісах на великих площах, надаючи точну інформацію про стан хвойних насаджень у динаміці. Це забезпечує можливість своєчасного визначення ділянок із пошкодженнями, оцінки масштабів деградації та дозволяє передбачати поширення проблемних зон на сусідні ділянки, що є важливим аспектом для запобігання екологічним та економічним втратам.

У рамках міжнародного процесу сталого управління лісами, підтримуваного Україною, розвиток методики моніторингу за допомогою космічних знімків є важливим кроком для забезпечення ефективного природоохоронного менеджменту. Дисертаційне дослідження зосереджене на розробці методики застосування супутникових знімків для виявлення, моніторингу та оцінки стану хвойних лісів у Прикарпатті, що є надійною основою для підвищення якості та оперативності природоохоронних заходів. Така методика стане цінним інструментом для лісових господарств, дозволяючи підвищити стійкість лісів до негативних факторів і сприяти їхньому довгостроковому збереженню.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі фотограмметрії та геоінформатики Національного університету «Львівська політехніка» і відповідає тематиці наукової діяльності кафедри: «Розроблення та дослідження методів фотограмметрії, дистанційного зондування та геоінформаційних технологій для кількісної та якісної оцінки явищ, об'єктів і процесів». Дисертація виконана в межах науково-дослідних робіт кафедри: «Методи, моделі і технології моніторингу стану довкілля та окремих об'єктів засобами фотограмметрії, дистанційного зондування та геоінформатики» (державний реєстраційний номер - 0118U001548) та «Застосування знімання з БПЛА та геоінформатики для моніторингу

довкілля та у військовій справі» (державний реєстраційний номер - 0123U101021).

Тема дисертації затверджена Вченою радою Навчально-наукового інституту геодезії Національного університету «Львівська політехніка» (Протокол № 3(165) від 01.11.2016 р.).

В Україні дослідженням стану лісів за даними ДЗЗ займаються такі вчені, як В. Лялько, М. Попов, С. Кохан, О. Сахацький, Зацерковний В., Миклуш С., Гаврилюк С., Часковський О. та ін. Серед зарубіжних вчених варто виділити внесок таких вчених - Seidl, R., G. Asner, R. E. Hall, M. C. Hansen, S. Ustin, S. G. Taylor, J. M. Mutti, P. Bouvier та ін. Ці науковці здійснюють дослідження з використанням передових технологій, що включають дистанційне зондування, LiDAR, ГІС. Їхні роботи сприяють глибшому розумінню динаміки лісів, біорізноманіття та впливу кліматичних змін.

Методи опрацювання космічних зображень для класифікації лісів на кафедрі фотограмметрії та геоінформатики досліджували проф., д.т.н. Бурштинська Х., к.т.н. Поліщук Б. та к.т.н. Бабушка А.

**Мета і завдання досліджень.** Метою дисертаційної роботи є удосконалення методики для виявлення ділянок із пошкодженими хвойними масивами за даними дистанційного зондування середнього та високого розрізнення, даними з БПЛА та з використанням наземного спектрофотометрування. Відповідно до мети дисертаційної роботи, поставлено такі основні завдання:

1) проаналізувати основні статистичні методи роздільності класів земної поверхні за космічними зображеннями;

2) здійснити наземне спектрофотометрування для різних типів хвойної рослинності та проаналізувати спектральні криві з метою вибору оптимальних вегетаційних індексів для виявлення пошкодженої хвойної рослинності;

3) розрахувати параметри знімання з БПЛА та виконати знімання для вибору тестових ділянок з метою проведення оцінки точності контрольованої класифікації;

4) створити композиційні зображення за вегетаційними індексами з метою покращення інтерпретаційних можливостей знімків;

5) опрацювати методику моніторингу стану лісів за різночасовими даними дистанційного зондування та дослідити зміни площ лісових об'єктів упродовж 2007-2022 рр.

**Об'єкт дослідження.** Стан хвойних лісів Прикарпатського регіону.

**Предмет дослідження.** Методика моніторингу стану хвойних лісів на підставі космічних знімків, знімків з БПЛА та наземного спектрофотометрування.

**Методи дослідження.** Для розв'язання комплексу завдань, які сформовано в дисертаційній роботі стосовно виявлення пошкоджених хвойних лісових масивів, застосовано загальнонаукові методи аналізу, синтезу та класифікації, методи математичного опрацювання даних дистанційного зондування та математичної статистики.

**Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Удосконалено методику виявлення пошкодженої та здорової хвойної рослинності на території Прикарпатського регіону за космічними зображеннями різної просторової розрізненості та матеріалами з БПЛА.

2. Вперше використано методику спектрофотометрування для дослідження стану хвойної рослинності Прикарпатського регіону.

3. На підставі даних спектрофотометрування здійснено вибір вегетаційних індексів для максимально ефективного розділення різних типів хвойної рослинності.

4. Подано аналіз методів розділення класів при класифікації лісових масивів на основі матриць із значеннями евклідової відстані, відстані Джефріса-Матусіти, дивергенції та трансформованої дивергенції.

5. Удосконалено методику класифікації лісових об'єктів на підставі композиційних зображень, отриманих із вегетаційних індексів.

**Практичне значення отриманих результатів.** Методика моніторингу стану лісових масивів може бути використана лісовими господарствами, природоохоронними організаціями та місцевими органами влади для оперативного контролю за хвойними насадженнями регіону. Методика надає змогу порівнювати дані різних років для визначення тенденцій у стані лісів, що є важливим для довгострокового планування лісогосподарських заходів. Аналіз динаміки стану лісів дає можливість оцінити вплив кліматичних змін на хвойні насадження та розробити адаптивні стратегії управління лісами. Отримані результати можуть бути інтегровані в інформаційні системи державного рівня, зокрема, використовуватись для обґрунтування рішень у галузі екологічної безпеки та сталого розвитку. Це сприятиме кращому контролю за екологічною ситуацією в регіоні та підвищенню екологічної відповідальності.

**Основні положення, що виносяться на захист.**

- 1) Методологічний підхід до визначення ділянок із пошкодженою хвойною рослинністю на підставі різних геопросторових даних.
- 2) Визначення ефективності спектрофотометрування для розрізнення різних типів пошкодженої хвойної рослинності
- 3) Опрацювання теоретичних засад для розв'язання завдання роздільності класів.
- 4) Використання даних БПЛА з метою визначення тестових ділянок для ідентифікації пошкоджених та засохлих лісових масивів.

**Особистий внесок здобувача.** Результати наукових досліджень, подані у дисертаційній роботі та винесені на захист, отримані автором самостійно. Загалом за темою дисертації опубліковано 13 наукових праць.

Основні положення та результати дисертаційної роботи, отримані автором, опубліковано у співавторстві у працях (Бурштинська, Х., Денис, Ю., Мадяр, Ю., & Поліщук, Б., 2016; Babushka, A., Burshtynska, Kh., &



Denys, Yu., 2017; Бурштинська, Х., Бабушка, А., Поліщук, Б., & Денис, Ю., 2017; Денис, Ю., Паштетник, О., & Поліщук, Б., 2017; Бурштинська, Х., Денис, Ю., Поліщук, Б., & Тимчишин М., 2018; Денис, Ю., Паштетник, О., & Поліщук, Б., 2018; Денис, Ю., Бурштинська, Х., & Поліщук, Б., 2019; Денис, Ю., Бурштинська, Х., & Паштетник, О., 2019; Burshtynska, K., Denys, Yu., & Polishchuk, V., 2019; Burshtynska, Kh., Petryk, Yu., Polishchuk, V., & Shylo Ye., 2019; Бурштинська, Х., & Петрик, Ю., 2023; Петрик, Ю., Бурштинська, Х., & Поліщук, Б., 2024) та одноосібно у праці (Денис, Ю., 2017).

Праці Бурштинська, Х., Денис, Ю., Поліщук, Б., & Тимчишин М., (2018), Денис, Ю., Бурштинська, Х., & Поліщук, Б. (2019) та Петрик, Ю., Бурштинська, Х., & Поліщук, Б., (2024) присвячені дослідженню стану лісів з використанням різночасових космічних знімків.

Методику двоетапної класифікації лісів Прикарпатського регіону з використанням знімка із системи QuickBird-2 реалізовано у працях Бурштинська, Х., Денис, Ю., Мадяр, Ю., & Поліщук, Б. (2016) та Бурштинська, Х., Бабушка, А., Поліщук, Б., & Денис, Ю. (2017).

У працях Денис, Ю., Паштетник, О., & Поліщук, Б., (2017) та Денис, Ю., Паштетник, О., & Поліщук, Б., (2018) подано результати польових досліджень вибраних тестових ділянок на території Тухлянського лісництва, дані польових досліджень використано при опрацюванні космічних знімків.

В працях Burshtynska, K., Denys, Yu., & Polishchuk, V., (2019) та Burshtynska, Kh., Petryk, Yu., Polishchuk, V., & Shylo Ye., (2019) опрацьовано технологічну схему визначення стану лісів з застосуванням технологій ГІС та даних ДЗЗ та проаналізовано результати спектрофотометрування з метою створення композиційних зображень за вегетаційними індексами для покращення інтерпретаційних можливостей виявлення пошкодженої хвойної рослинності.

У праці Бурштинська, Х., & Петрик, Ю., (2023) досліджено можливість використання знімків із сузір'я наносупутників PlanetScope для визначення стану хвойних лісів.

Також досліджено теоретичні аспекти контрольованої класифікації, зокрема статистичні методи розділення класів (Бурштинська, Х., Денис, Ю., Мадяр, Ю., & Поліщук, Б., 2016; Babushka, A., Burshtynska, Kh., & Denys, Yu., 2017). Здійснено аналіз ефективності розділення класів за зображенням лісового масиву (Денис, Ю., 2017).

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати наукових досліджень, що включені до дисертації, доповідались і обговорювались на міжнародних наукових конференціях та семінарах, а саме:

- XXII Міжнародна науково-технічна конференція «Геофорум 2017», (Львів-Брюховичі-Яворів, Україна, 2017 р.);
- VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Моніторинг довкілля, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології та перспективи розвитку», (Львів-Східниця, Україна, 2017 р.);
- Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «GeoTerrace-2017», (Львів, Україна, 2017 р.);
- XXIII Міжнародна науково-технічна конференція «Геофорум 2018», (Львів-Брюховичі-Яворів, Україна, 2018 р.);
- Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «GeoTerrace-2018» (Львів, Україна, 2018 р.);
- XXIV Міжнародна науково-технічна конференція «Геофорум 2019» (Львів-Брюховичі-Яворів, Україна, 2019 р.);
- The 9th International Scientific-Technical Conference «Environmental Engineering, Photogrammetry, Geoinformatics Modern Technologies and Development Perspectives», (Lublin, Poland, 2019);

- X Міжнародна науково-технічна конференція «Моніторинг довкілля, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології та перспективи розвитку», (Львів, Україна, 2023 р.).

**Публікації.** Основні положення дисертації опубліковано у 13 наукових працях. Серед них: 3 публікації у наукових періодичних виданнях України, яке внесено до міжнародних наукометричних баз даних, 1 публікація у науковому періодичному виданні іншої держави, яке внесено до міжнародних наукометричних баз даних, 3 публікації у наукових фахових виданнях України та 6 публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації та які додатково відображають наукові результати дисертації.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, вступу, трьох розділів основної частини, висновків та списку літератури. Загальний обсяг дисертації становить 145 сторінок, зокрема 110 сторінок основної частини, включаючи 45 рисунків, 24 таблиці та 135 позицій списку літератури.

# РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ МОНІТОРИНГУ ЛІСІВ ПРИКАРПАТСЬКОГО РЕГІОНУ

## 1.1. Загальна характеристика лісів України

Ліс – це тип природних комплексів, у якому поєднуються переважно деревна та чагарникова рослинність з відповідними ґрунтами, трав'яною рослинністю, тваринним світом, мікроорганізмами та іншими природними компонентами, що взаємопов'язані у своєму розвитку, впливають один на одного і на довкілля (Лісовий кодекс України, 1994).

Загальна площа лісового фонду України становить 10,4 млн. га.

Лісистість території – це відношення у відсотках площі вкритої лісовою рослинністю земель до її загальної площі. Фактична лісистість території України - 15,9%. Для порівняння, за даними ФАО, у Швеції лісистість становить 67,7%, у Фінляндії – 58,9%, у США – 32,7%, в Німеччині – 29%, у Франції – 28,7%, в Канаді – 26,6%, в Італії – 21,2% (Доскіч, 2015). За площею лісів Україна займає у Європі 9-те місце, за запасами деревини - 6-те.

Розташовані ліси на території України нерівномірно, найвища лісистість в Поліссі та Українських Карпатах (рис. 1.1.).

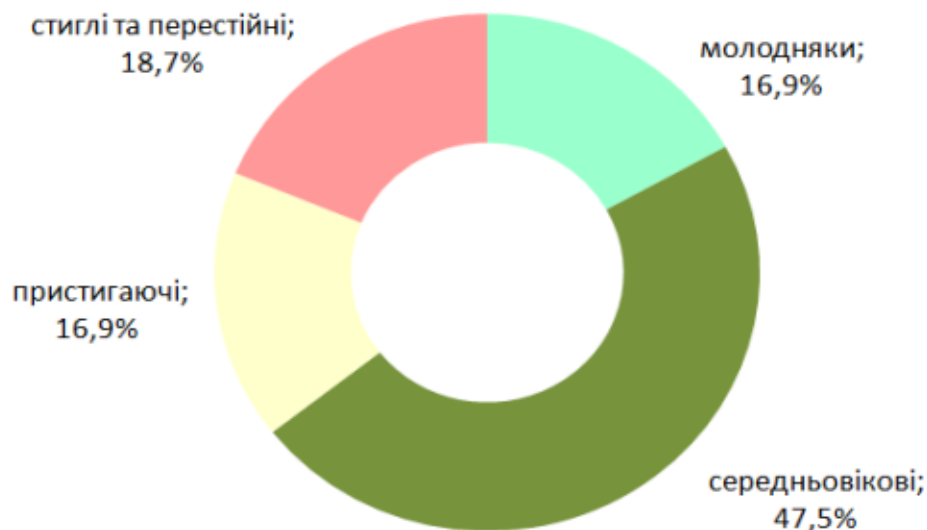


*Рис. 1.1. Лісистість території України у розрізі адміністративно-територіальних одиниць, % (Державне агентство лісових ресурсів України, 2019)*

В лісовому господарстві України використовують такий поділ лісів за віком:

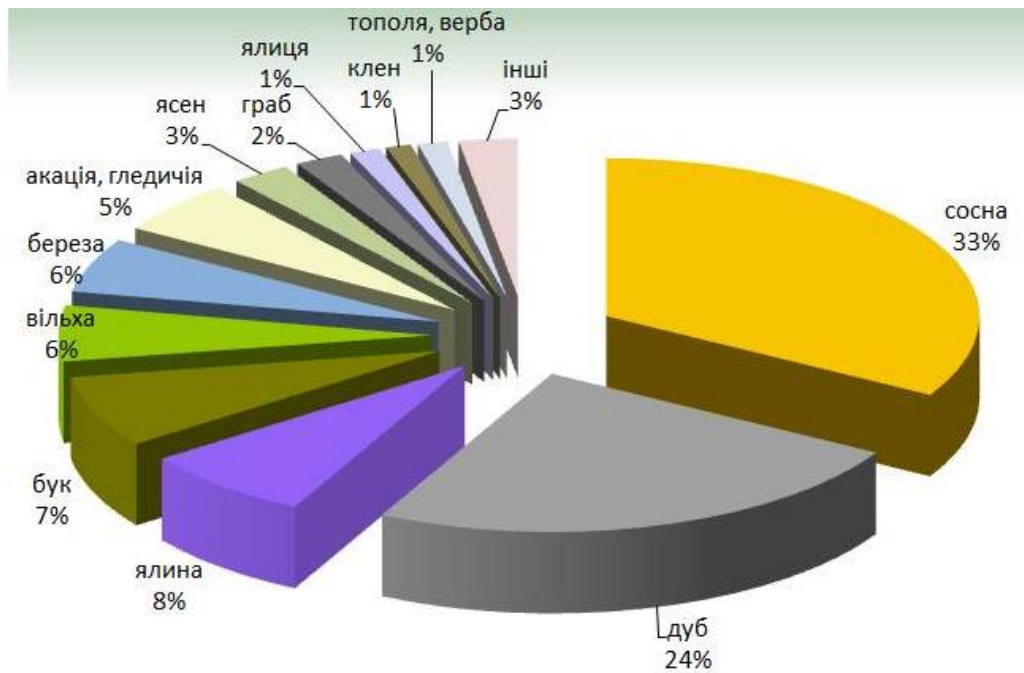
- молодняки (вік до 40 років);
- середньовікові (40—60 років);
- пристигаючі (60—80 років);
- стиглі та перестійні (понад 80 років).

У віковій структурі переважають середньовікові насадження, частка стиглих та перестиглих насаджень становить 18,7% (рис. 1.2). Середній вік лісів - понад 60 років, відбувається поступове старіння лісів, що призводить до погіршення їх санітарного стану (Публічний звіт Голови Державного Агентства Лісових Ресурсів України за 2023 рік, 2023).



**Рис. 1.2.** Поділ лісових насаджень України за віком ( Публічний звіт Голови Державного Агентства Лісових Ресурсів України за 2023 рік, 2023)

У лісах України виділяють понад 30 видів порід дерев, серед них переважають сосна, дуб, бук, ялина, береза, вільха, ясен, граб та ялиця. Хвойні насадження займають 43% загальної площі, зокрема, сосна – 35%. Твердолистяні насадження становлять 43%, зокрема, дуб і бук – 37%. На рис. 1.3 показано розподіл площі лісів України за переважаючими породами дерев.



**Рис. 1.3.** Розподіл площі лісів України за породами дерев (Державне агентство лісових ресурсів України, 2023)

Запас деревини в українських лісах становить близько 2,3 млрд м<sup>3</sup>. Щорічний приріст деревини в країні досягає 35 млн м<sup>3</sup>. У лісах, що знаходяться під управлінням Держлісагентства, середньорічний приріст деревини становить 3,9 м<sup>3</sup> на 1 гектар. Запас деревини на кожному гектарі лісів України в середньому складає 235 м<sup>3</sup>, що для порівняння є меншим, ніж у Польщі (288 м<sup>3</sup>), але значно перевищує показники Швеції (131 м<sup>3</sup>). (Публічний звіт Голови Державного Агентства Лісових Ресурсів України за 2023 рік, 2023).

Важливим показником продуктивності лісових насаджень є бонітет лісу, який визначається низкою характеристик, таких як середня висота дерев залежно від їхнього віку, середній об'єм стовбура, кількість дерев на 1 гектар, а також запас деревини (об'єм деревини на 1 гектар), поточний та середній прирости запасу деревини. Для кожної породи дерев і рівня бонітету розробляються таблиці росту лісостанів, які відображають значення зазначених параметрів від моменту посадки до віку перестиглості з інтервалом у 10–20 років (Миклуш С., Гаврилук С., & Часковський О., 2012).

Розрізняють п'ять класів бонітету: 1-й клас включає найпродуктивніші насадження, які порівняно з іншими того ж віку забезпечують максимальний приріст деревини; 5-й клас охоплює найменш продуктивні ліси. Для насаджень із продуктивністю вищою за 1-й клас або нижчою за 5-й застосовують індексні позначення: 1а, 1б, 5а, 5б. Бонітет залежить від ґрунтово-кліматичних умов, які важливо враховувати під час планування заходів з підвищення продуктивності лісів. У гірських районах Карпат і Криму цей показник залежить від крутизни схилів, що впливає на глибину ґрунту, його вологість та родючість. Висоту дерев і клас бонітету визначають за шкалою М. Орлова (Генсірук, 2004; Орлов, 1913).

Відповідно до Лісового та Земельного кодексів України, ліси України можуть перебувати у державній, комунальній та приватній власності. Згідно з публічним звітом Голови Державного агентства лісових ресурсів України за 2023 рік, більшість лісів України перебуває у державній власності. Близько 1,3 млн га (13%) земель лісогосподарського призначення належать до комунальної власності та перебувають у постійному користуванні комунальних підприємств, підпорядкованих органам місцевого самоврядування. Частка лісів приватної власності становить менше 0,2% від загальної площі лісових земель. Приблизно 0,8 млн га лісових земель віднесені до земель запасу та наразі не надані у користування. Найбільшу площу лісових земель використовують лісогосподарські підприємства Держлісагентства. Розподіл земель лісового фонду України за відомчою підпорядкованістю станом на 01.01.2019 наведено в таблиці 1.1.

*Таблиця 1.1*

***Розподіл загальної площі земель лісового фонду України за відомчою підпорядкованістю***

	Площа лісів, га (%)
Державне агентство лісових ресурсів України	7580 тис. га (73,0%)
Органи місцевого самоврядування	1250 тис. га (12,0%)

Землі запасу (не надані у користування)	777 тис. га (7,5%)
Державне агентство з управління зоною відчуження	218 тис. га (2,1%)
Міністерство екології та природних ресурсів України	164 тис. га (1,6%)
Міністерство оборони України	133 тис. га (1,3%)
Міністерство інфраструктури України	118 тис. га (1,1%)
Адміністрація Президента України	61 тис. га (0,6%)
Міністерство освіти і науки України	22 тис. га (0,2%)
Національний університет біоресурсів і природокористування	18 тис. га (0,2%)
Громадяни, яким надані ліси у власність і користування	17 тис. га (0,2%)
Інших міністерства і відомства	21 тис. га (0,2%)

Така особливість лісового господарства держави як багатовідомча структура використання лісів, дещо ускладнює реалізацію єдиної лісової політики в країні.

Згідно Постанови Кабінету Міністрів України № 733 від 16 травня 2007 р. «Про затвердження Порядку поділу лісів на категорії та виділення особливо захисних лісових ділянок», ліси, залежно від основних виконуваних ними функцій, поділяються на такі категорії:

- ліси природоохоронного, наукового, історико-культурного призначення;
- рекреаційно-оздоровчі ліси;
- захисні ліси;
- експлуатаційні ліси.

Ліси природоохоронного, наукового та історико-культурного призначення включають ділянки лісових масивів, що виконують природоохоронну й естетичну функції, служать базою для довгострокових наукових досліджень і сприяють збереженню унікальних та інших цінних природних комплексів, а також історико-культурних об'єктів.



До рекреаційно-оздоровчих лісів належать території, які виконують рекреаційні, санітарно-гігієнічні та оздоровчі функції. Ці ліси використовуються для туризму, санаторно-курортного лікування та відпочинку населення.

Захисні ліси – це ділянки лісових масивів, які забезпечують захист природного середовища та інженерних об'єктів від негативного впливу природних і антропогенних чинників.

Експлуатаційні ліси – це лісові ділянки, що не належать до природоохоронних, наукових, історико-культурних, рекреаційно-оздоровчих або захисних категорій. Їх основне призначення – забезпечення національної економіки деревиною.

Управління в галузі використання, відтворення та охорони лісів - це діяльність виконавчих органів держави, самоврядних та громадських організацій, яка регулюється лісовим законодавством (Бондарчук, 2012). Основні функції управління включають:

- управління розподілом і перерозподілом лісових ресурсів;
- проведення державного лісового кадастру та обліку лісових масивів;
- моніторинг стану лісів і лісова сертифікація;
- розробка лісовпорядкування;
- організація відтворення та розведення лісових насаджень;
- забезпечення державного контролю за охороною, захистом, використанням та відтворенням лісів;
- вирішення конфліктних ситуацій у сфері охорони, захисту, використання та відтворення лісів.

Повноваження щодо управління лісами визначені Лісовим кодексом України і відповідають положенням Закону України «Про центральні органи виконавчої влади», 2011. Відповідно до цього закону, формує лісову політику профільне Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, а реалізацію здійснює Державне агентство лісових ресурсів України.

Відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 07 вересня 2022 № 1003 «Деякі питання реформування управління лісової галузі» утворено міжрегіональні управління лісового та мисливського господарства. Згідно із Положенням про міжрегіональні управління лісового та мисливського господарства Державного агентства лісових ресурсів України, затвердженого наказом Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 29 вересня 2022 № 404, зареєстрованим в Міністерстві юстиції України 13.10.2022 за № 1231/38567, міжрегіональні управління підпорядковуються Держлісагентству та є його територіальними органами (табл. 1.2).

*Таблиця 1.2*

***Територіальні органи Державного агентства лісових ресурсів України***

Назва	Розташування	URL
Північно-Західне міжрегіональне управління лісового та мисливського господарства	м. Рівне	<a href="https://nw.forest.gov.ua/">https://nw.forest.gov.ua/</a>
Західне міжрегіональне управління лісового та мисливського господарства	м. Львів	<a href="https://w.forest.gov.ua/">https://w.forest.gov.ua/</a>
Південно-Західне міжрегіональне управління лісового та мисливського господарства	м. Хмельницький	<a href="https://sw.forest.gov.ua">https://sw.forest.gov.ua</a>
Центральне міжрегіональне управління лісового та мисливського господарства	м. Житомир	<a href="https://c.forest.gov.ua/">https://c.forest.gov.ua/</a>

Північне міжрегіональне управління лісового та мисливського господарства	м. Чернігів	<a href="https://n.forest.gov.ua/">https://n.forest.gov.ua/</a>
Північно-Східне міжрегіональне управління лісового та мисливського господарства	м. Харків	<a href="https://ne.forest.gov.ua/">https://ne.forest.gov.ua/</a>
Південно-Східне міжрегіональне управління лісового та мисливського господарства	м. Дніпро	<a href="https://se.forest.gov.ua/">https://se.forest.gov.ua/</a>
Південне міжрегіональне управління лісового та мисливського господарства	м. Миколаїв	<a href="https://s.forest.gov.ua/">https://s.forest.gov.ua/</a>

Основними завданнями міжрегіональних управлінь є реалізація повноважень Держлісагентства у сфері лісового та мисливського господарства на території декількох адміністративно-територіальних одиниць, визначених Держлісагентством.

До підвідомчих підприємств та установ безпосереднього підпорядкування Держлісагентству належать: Державне спеціалізоване господарське підприємство "Ліси України", Науково-дослідний інститут лісового господарства і агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького (УкрНДІЛГА), Український науково-дослідний інститут гірського лісівництва імені П.С. Пастернака (УкрНДІГірліс), Українське державне проектне лісовпорядне виробниче об'єднання (ВО "Укрдержліспроект"), Український центр підготовки, перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів лісового господарства (Укрцентркадріліс), Харківський державний проектно-вишукувальний інститут агролісомеліорації і лісового господарства (ДП "Харківдіпроагроліс"), Державне підприємство «Лісогосподарський інноваційно-аналітичний центр», Державна організація «Український

лісовий селекційний центр», Державні спеціалізовані лісозахисні підприємства «Харківлісозахист», «Херсонлісозахист», «Київлісозахист», «Львівлісозахист» та Національні природні парки «Бойківщина», «Галицький», «Зачарований край», «Мале Полісся» та «Сколівські Бескиди».

Ведення лісового господарства України регулюється такими основними нормативно-правовими актами:

- Лісовий кодекс України від 21 січня 1994 № 3852-ХІІ;
- Земельний кодекс України від 25 жовтня 2001 № 2768-ІІІ (регулює земельні відносини при використанні лісів, а також рослинного й тваринного світу);
- Про охорону навколишнього природного середовища: Закон України від 25 червня 1991 № 1264-ХІІ щодо збереження й відтворення лісів;
- Про оренду землі: Закон України від 06 жовтня 1998 № 161-ХІV;
- Про оцінку впливу на довкілля: Закон України від 23 травня 2017 № 2059-VIII;
- Про природно-заповідний фонд України: Закон України від 16 червня 1992 № 2456-ХІІ.

Важливим документом державного планування в лісовому господарстві є Державна стратегія управління лісами України до 2035 року, затверджена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 29 грудня 2021 року № 1777-р. Головною метою Стратегії є забезпечення ефективного управління лісами шляхом впровадження принципів сталого лісокористування, збереження біорізноманіття та адаптації лісового господарства до змін клімату. Основні проблеми, які планується вирішити у рамках Державної стратегії управління лісами України до 2035 року, відображені у таблиці 1.3. (Державна стратегія управління лісами України до 2035 року, 2020)

**Проблеми лісового господарства, для розв'язання яких розроблена  
Стратегія управління лісами України до 2035 року**

1	необхідність досягнення балансу між екологічними, економічними та соціальними функціями лісового господарства.
2	неефективний розподіл управлінських функцій, що подекуди призводить до дублювання або невиконання окремих завдань
3	проблема корупції та поширення незаконної діяльності в лісовій сфері
4	нерівномірне фінансування лісогосподарських заходів, недостатнє забезпечення необхідних робіт і дефіцит кваліфікованих фахівців
5	погіршення санітарного стану лісових масивів
6	відсутність актуальних даних про стан лісів і лісове господарство в Україні
7	складнощі у реалізації прав власності та користування лісовими ресурсами
8	нерегульованість механізмів управління лісами, що перебувають у комунальній власності
9	брак економічних стимулів для впровадження природозберігаючих технологій, охорони, захисту та відтворення лісів, особливо на приватних землях
10	відсутність прозорих механізмів продажу деревини, поширення незаконних рубок і нелегального обігу деревини
11	низький рівень довіри суспільства до працівників лісового господарства
12	недостатнє залучення громадян до використання лісів у рекреаційних цілях
13	брак розвиненої інфраструктури для рекреації та екоосвіти в місцях масового відпочинку

Міжнародні зобов'язання України у галузі лісового господарства, у яких Україна бере участь, поділяються на добровільні та юридично обов'язкові (Звіт про стратегічну екологічну оцінку Державної стратегії управління лісами України до 2035 року, 2020).

До добровільних зобов'язань належать:

- зобов'язання України в рамках виконання «Стратегічного плану ООН щодо лісів на період 2017-2030 роки», які включають бачення України стосовно виконання глобальних цілей стосовно лісів;
- зобов'язання України в рамках національного досягнення цілі 15 збалансованого розвитку «Збереження екосистем суші»;
- зобов'язання України в рамках співпраці з процесом «Лісова Європа».

До юридично обов'язкових зобов'язань належать:

- зобов'язання в рамках виконання Протоколу про стале управління лісами в рамках Карпатської конвенції;
- Зобов'язання в рамках Бернської конвенції про охорону дикої флори та фауни і природних середовищ існування в Європі;
- Зобов'язання в рамках Конвенції про біологічне різноманіття.

Також наша держава має добровільні зобов'язання стосовно надання міжнародної звітності в рамках глобальної оцінки лісових ресурсів та звітності стосовно виконання загальноєвропейських критеріїв та індикаторів сталого лісоуправління (звітність 1 раз на 5 років ).

Згідно Угоди про асоціацію між Україною та Європейським Союзом, співпраця здійснюється в рамках Підкомітету Україна-ЄС Комітету Асоціації Україна – ЄС у торгівельному складі стосовно виконання статті 294 вищезазначеної угоди.

Також здійснюється співробітництво з Турецькою, Польською, Австрійською, Словацькою Фінляндською Республіками та Словенією, в рамках міждержавних та відомчих угод та меморандумів про взаєморозуміння.

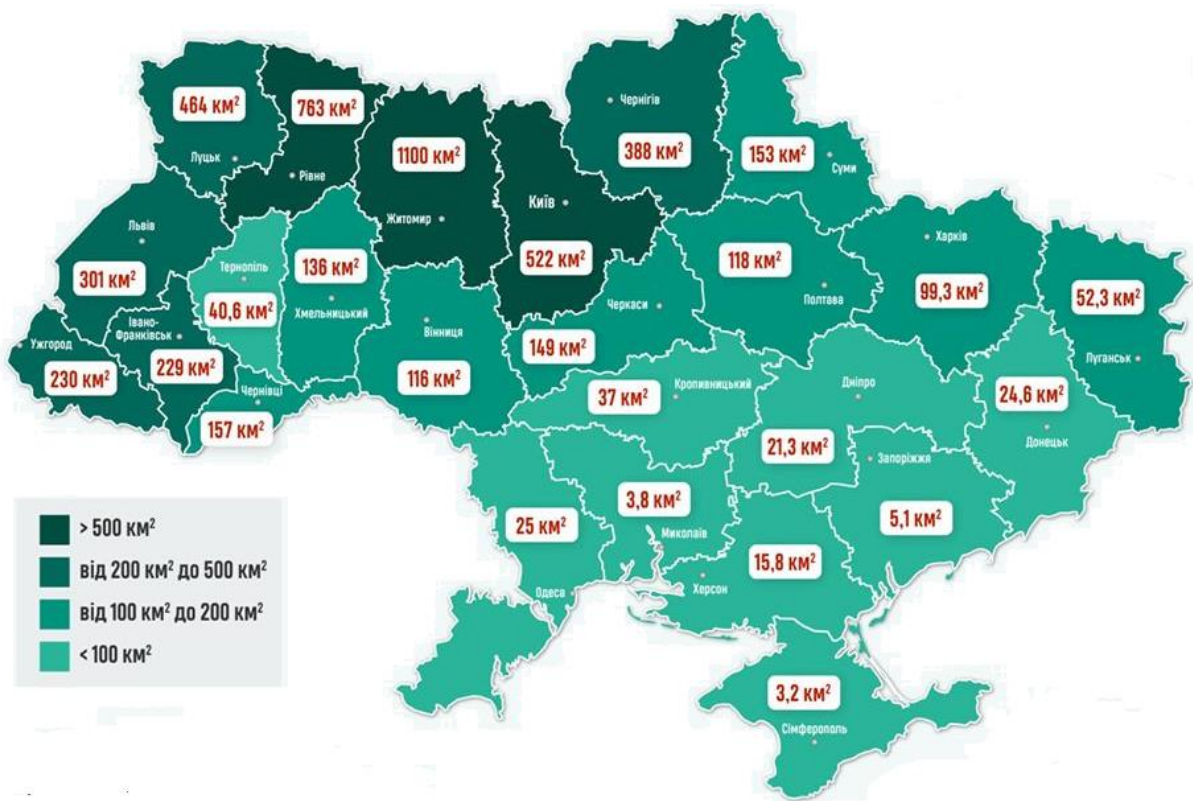
Всесвітній фонд природи (WWF) в Україні активно працює над збереженням лісових екосистем, а також сприяє сталому управлінню лісами та їхньому відновленню. Організація реалізує проекти, спрямовані на зменшення незаконної вирубки лісів, збереження біорізноманіття, відновлення природних ландшафтів і впровадження екологічно

відповідальних практик лісокористування, зокрема проведення сертифікації лісів за стандартами FSC (Forest Stewardship Council). WWF-Україна співпрацює з державними органами для розробки стратегії відновлення лісових ресурсів у післявоєнний період (WWF-Україна, б.д.).

Одним з проєктів Всесвітнього фонду природи в Україні є ініціатива з відновлення лісів у Львівській області, де WWF спільно з SoftServe працює над створенням «лісу майбутнього». Цей проєкт передбачає використання принципів кліматично-розумного та природо-орієнтованого лісівництва (Платформа відновлення лісів України, 2024).

Global Forest Watch (GFW) - онлайн-платформа для моніторингу стану лісів. Проєкт запущений у 2014 році компанією Google у співпраці з Інститутом світових ресурсів та ще 40 організаціями. Набір даних про втрати лісового покриву створено спільно Університетом Меріленду, Google, USGS та NASA на основі супутникових знімків Landsat. GFW відображає зміни лісового покриву, базуючись на супутникових знімках, без врахування інших джерел даних. Тому при використанні даних з GFW потрібно враховувати, що існує два види втрати лісового покриву: знеліснення (deforestation), коли лісовий покрив зникає назавжди, а землі перетворюються на сільськогосподарські угіддя, житлові забудови або кар'єри; вирубки в межах лісогосподарської діяльності (forest management), коли ліси вирубуються законно і на місці вирубки планується відновлення лісів (Global Forest Watch, б.д.).

Дані порталу Global Forest Watch щодо зменшення лісових територій протягом 2011—2018 років наведено на рис. 1.4.



*Рис. 1.4. Втрати лісів України протягом 2011-2018 рр. (Зелений фонд, 2019)*

Громадська організація «Лісові ініціативи і суспільство» (ЛІС) - неурядова організація, яка займається питаннями сталого управління лісовими ресурсами, охорони довкілля та підвищення екологічної свідомості в суспільстві. Учасники ГО «ЛІС» проводять моніторинг незаконних рубок та інших видів протиправної діяльності, використовуючи як аналіз серій супутникових знімків, так і наземні польові обстеження. Дистанційний моніторинг змін лісового покриву старовікових лісів виконується у рамках реалізації проєкту «Боротьба із незаконними рубками в Україні» за підтримки відділу Міжнародних програм Лісової служби США. Моніторинг здійснюється з 2020 року шляхом періодичного порівняння серій супутникових зображень та часткового використання автоматизованої системи супутникового моніторингу українських лісів Deep Green Ukraine (<https://www.deepforest.org.ua/map/>).

Система Deep Green Ukraine розроблена для автоматичного виявлення змін лісового покриву за даними супутникових знімків і аналізу відкритих



даних державних установ (земельний кадастр, лісові карти, лісорубні квитки тощо), які можуть свідчити про незаконні рубки, але не мають у відкритому доступі документальних підтверджень їх законності. Deep Green Ukraine є спільним проєктом Інституту космічних досліджень НАН України та Державного космічного агентства України, ГО "Центр Моніторингу Влади" та ГО "ЛіС". На даний момент функціонування системи призупинено через відсутність автоматизованого доступу до відкритих картографічних даних Державного підприємства «Лісогосподарський Інноваційно-Аналітичний Центр» та публічної кадастрової карти у зв'язку з воєнним станом (Карабчук і ін., 2024).

Всеукраїнська громадська організація «Товариство лісівників України» - це неприбуткова організація з всеукраїнським статусом. Основними завданнями ГО "Товариство лісівників України" є привернення уваги суспільства та органів влади до актуальних проблем лісового господарства, розробка і впровадження національної лісової політики, а також подання пропозицій до органів влади щодо вдосконалення лісового законодавства. Організація сприяє формуванню екологічної свідомості населення шляхом популяризації знань про ліси, підтримує лісівничі ініціативи та займається просвітницькою і профорієнтаційною роботою серед молоді. Важливим напрямком діяльності є функціонування шкільних лісництв, які створені у більшості лісових господарств України (Про Товариство Лісівників України, 2024).

Більша частина лісів в Україні є штучно створеними і потребують інтенсивного догляду. Приблизно 0,8 млн гектарів лісів, що раніше належали колективним господарствам, перебувають на землях запасу та знаходяться у незадовільному стані (самовільні вирубки, пожежі, хвороби, шкідники тощо). У зв'язку зі зміною клімату необхідно переглянути застарілі підходи до ведення лісового господарства, які не забезпечують достатню стійкість лісів до нових умов. Важливим аспектом є охорона лісового біорізноманіття: централізовані системи моніторингу

біорізноманіття в лісах не розроблені та не впроваджені, що призводить до відсутності достовірних даних про стан та динаміку лісового біорізноманіття. Також відсутні необхідні заходи для запобігання деградації біорізноманіття та лісів загалом. Нагальною є потреба у вдосконаленні інформаційної системи управління лісами шляхом впровадження національної інвентаризації лісів та поліпшення моніторингу. Також необхідно суттєво реформувати систему лісовпорядкування.

Війна, яку Російська федерація розпочала проти України, щодня загрожує екологічній безпеці тисяч людей та завдає великої шкоди лісам і природним ландшафтам, ускладнюючи лісогосподарську діяльність. З 24 лютого 2022 року приблизно 30% лісів України постраждали внаслідок воєнних дій. На окупованих та деокупованих територіях лісами переміщується важка військова техніка, розташовуються військові частини, а також тривають активні бойові дії, що спричиняє серйозні порушення лісових екосистем та забруднення ґрунтів і вод. Повна оцінка шкоди лісам ускладнена через забруднення вибухонебезпечними предметами та небезпеку для фахівців. Ліси належать до третьої категорії пріоритетності для розмінування. Відповідно стале управління лісами можливе лише після підтвердження безпеки та доступності цих територій. За інформацією Державної екологічної інспекції України, за березень-грудень 2022 року ракетами та снарядами було випалено 59 150 га українських лісів й насаджень.

## **1.2. Аналіз літературних джерел стосовно дослідження стану лісів**

Ліси є складними і динамічними екосистемами, які надають суспільству широкий спектр екологічних, економічних та соціокультурних цінностей. Ці цінності включають в себе багато товарів і послуг, таких як виробництво води, збереження ґрунтів, поглинання вуглецю, середовище проживання для дикої природи, надання корму та різноманітні лісові продукти (Keleş, Durusoy & Çakir, 2017). Ліси також надають різноманітні культурні

екосистемні послуги, такі як рекреація, естетика ландшафту або культурна спадщина (Tiemann & Ring, 2018). Крім того, вони діють як природні бар'єри, що пом'якшують наслідки зміни клімату та природних катастроф, таких як запобігання зсувам та потокам сміття, пом'якшення повеней та інші (Unterberger & Olschewski, 2021). В свою чергу, зростаючий антропогенний вплив на лісові ресурси для задоволення суспільних потреб, посилює загальну негативну тенденцію у використанні лісових ресурсів. Площа лісових земель у всьому світі зменшується з року в рік, що вимагає кращих методів управління лісами для оптимального використання їх ресурсів (Treitz & Howarth, 2000). Таким чином, дослідження стану лісів є важливим завданням, що вимагає використання сучасних технологій та врахування численних викликів.

В цілому методика дослідження стану лісів включає такі групи методів:

- традиційні методи, як наприклад, лісова таксація;
- сучасні методи, як наприклад, дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), ГІС-технології, лідарне сканування (LiDAR).

Розглянемо кожен з цих методів більш детально.

Лісова таксація (з лат. *taxation* – оцінка) є однією з найважливіших для лісової галузі наук. Лісова таксація – це процес оцінки лісових ресурсів, що включає в себе визначення площі лісу, віку, породного складу, здоров'я дерев, запасу деревини та інших параметрів, які мають важливе значення для лісового господарства, охорони природи та планування. Таксаційні дані використовуються для планування ведення лісового господарства, оцінки продуктивності лісу, а також для контролю за дотриманням екологічних норм і стандартів.

Основні аспекти, що включає таксація лісу, можна розділити на кілька ключових компонентів:

- *Визначення площі лісу* – вимірювання загальної площі лісових угідь, яке може здійснюватися за допомогою традиційних наземних методів чи сучасних технологій.

– *Визначення запасу деревини.* Запас деревини визначається як об'єм дерев на даній площі. Це дозволяє оцінити потенційну кількість деревини, що може бути отримана при вирубці. Об'єм дерев вимірюється в кубічних метрах і може бути розрахований за допомогою формул, які враховують висоту та діаметр дерева на визначеній висоті.

– *Оцінка видового складу та віку.* Видовий склад вказує на різноманітність порід дерев, які ростуть в лісі. Вік дерев важливий для розуміння стадій розвитку лісу і планування його подальшого використання. Ці дані можуть бути отримані з використанням різноманітних методів, включаючи візуальний огляд, відлік річних кілець у зразках деревини тощо.

– *Оцінка стану здоров'я лісу.* Оцінка здоров'я лісу включає виявлення заражених, хворих чи пошкоджених дерев, а також оцінку впливу шкідників, хворіб і абіотичних факторів. Це важливо для розробки заходів щодо захисту та відновлення лісу.

– *Планування використання лісу.* На основі зібраних даних розробляються плани ведення лісу, які можуть включати вирубку, лісовідновлення, охорону та інші заходи. Важливо, щоб таке планування здійснювалося з урахуванням екологічних, економічних та соціальних факторів.

Перші публікації, присвячені питанням лісової таксації, з'явилися у 1812 році з виходом книг «Niedere und höhere Stereometrie» (Нижча і вища стереометрія) Гофельда (Hofeld, 1812) та «Anleitung zur Holztaxation» (Інструкція з таксації деревини) Кьоніга (König, 1813). Найвідомішими зарубіжними працями початку ХХ століття в даному напрямку були публікації:

– німецьких вчених – «Lehrbuch der Holzmesskunde» Мюллера (Müller, 1923) та «Lehrbuch der Holzmassenermittlung» Тішендорфа (Tischendorf, 1927);

– французьких вчених – «Dendrometrie» (Дендрометрія) і «Economie forestiere» (Лісове господарство) Гюффела (Huffel, 1919), «Cubage des bois»

(Кубування деревини) Рульо; (Roulleao R. Cubage Des Bois Sur Pied Et Abattus)

– англійських вчених – «A Manual of Forestry: Forest management» (Посібник з лісівництва: Лісовпорядкування) Шліха (Schlich, 1911), «Forest Mansuration» (Обмір лісу) Гревза (Graves, 1907).

Далі у 60–70-х роках ХХ століття лісову таксацію докорінно змінили математичні методи та ЕОМ. У цей період активно працювали такі видатні вчені, як М. П. Анучин (Заячук, 2008; Миронюк & Свинчук, 2014) та А. З. Швиденко (Швиденко, А., Воронін & Новохатний, 1971), з чийми іменами був пов'язаний подальший розвиток лісової таксації.

Найбільш відомими вченими-таксаторами лісової галузі України пострадянського періоду стали А. А. Строчинський (Строчинський, Кашпор, & Поляков, 2007; Строчинський & Кашпор, 2007), Є. І. Цурик (Цурик, 2008), С. М. Кашпор (Кашпор, 1999; Кашпор & Строчинський, 2013), С. І. Миклуш (Миклуш, 2011), О. А. Гірс (Гірс, Новак & Кашпор, 2004; Гірс & Киричок, 2010; Гірс, 1999), В. П. Пастернак (Пастернак, 2011), Ю. Й. Каганяк (Каганяк, 2000; Каганяк, Гриник & Лавний, 2002), Г. Г. Гриник (Гриник, 2013), М. М. Гром (Гром, 2007).

За останні роки в Україні проведено численні дослідження, накопичено великий експериментальний матеріал щодо біотичної продуктивності лісів, узагальнено дані та встановлено закономірності розподілу біомаси за компонентами (Блищик, 2014; Васишин, 2007; Володимиренко, 2006; Домашовець, 2008; Лакида, Лашенко & Лашенко, 2006; Лакида, Бокоч, Васишин & Терентьев, 2015; Морозюк, 2009). Однак ці дослідження не охоплюють усе різноманіття лісових екосистем, а наявні дані не дають просторового уявлення.

Технології просторової характеристики даних – ДЗЗ та ГІС – змінили спосіб, яким суспільство сприймає, оцінює та управляє природними ресурсами (Young & Giese, 2003). Геопросторові дані, отримані за допомогою ДЗЗ, легко інтегруються у бази даних ГІС, створюючи можливість аналізу

великих територій, що є важливим для узагальнення певних спостережень або для виявлення тенденцій у дослідженнях стану лісів.

ДЗЗ є потужним інструментом для моніторингу та аналізу змін у лісових екосистемах. Воно дозволяє отримувати високоточні дані на великих територіях і забезпечує безперервний моніторинг з плином часу. Основні аспекти, що включає ДЗЗ, можна розділити на кілька ключових компонентів:

– *Виявлення вирубок та знищення лісів.* Супутникові знімки дозволяють виявляти ділянки незаконних вирубок, лісових пожеж та інших видів деградації лісів. Це здійснюється шляхом порівняння зображень, отриманих у різні часові періоди.

– *Класифікація типів рослинності.* Супутникові дані використовуються для класифікації типів рослинності та визначення видової структури лісових насаджень. Це допомагає виявити зміни у видовому складі лісів.

– *Оцінка біомаси та вуглецевих запасів.* За допомогою багатоспектральних та гіперспектральних супутникових знімків можна оцінити біомасу лісів та кількість вуглецю, збереженого в лісових екосистемах. Це важливо для оцінки впливу лісів на кліматичні зміни.

– *Картографування ландшафтних змін.* Супутникові знімки використовуються для створення карт змін у ландшафтах, включаючи розширення сільськогосподарських угідь, урбанізацію, зміни у водному режимі територій.

– *Виявлення наслідків природних катастроф.* Супутникові дані дозволяють оперативно виявляти наслідки природних катастроф, таких як повені, урагани, землетруси, та оцінювати їх вплив на лісові та інші екосистеми.

– *Моделювання динаміки ландшафтів.* Використання супутникових знімків дозволяє моделювати динаміку змін ландшафтів у часі та прогнозувати майбутні зміни.

ДЗЗ забезпечують регулярне та масштабне охоплення територій, що дозволяє вести постійний моніторинг. Сучасні супутникові системи забезпечують високу просторову та спектральну роздільну здатність, що

дозволяє отримувати детальну інформацію про стан лісів. Багато супутникових даних, наприклад, з супутників Landsat, Sentinel, є доступними для безкоштовного використання, що спрощує їх застосування у наукових дослідженнях.

Таким чином, ДЗЗ є надзвичайно важливим інструментом для моніторингу та аналізу змін у лісових екосистемах. Використання супутникових знімків дозволяє оперативно виявляти зміни, аналізувати їх причини та наслідки, а також приймати обґрунтовані рішення щодо збереження та управління лісовими ресурсами. Це сприяє сталому розвитку лісового господарства та збереженню природних ландшафтів.

В свою чергу, ГІС-технології є потужними інструментами для збору, зберігання, аналізу та візуалізації просторових даних. У контексті дослідження стану лісів ГІС-технології дозволяють проводити моделювання екосистем та здійснювати просторовий аналіз, що є важливим для ефективного управління лісовими ресурсами, збереження біорізноманіття та моніторингу екологічних процесів:

- *Моделювання екосистем за допомогою ГІС* включає створення та аналіз цифрових моделей, які відображають складні взаємодії між компонентами екосистеми. Основні аспекти моделювання екосистем у лісовому господарстві включають:
  - Моделювання біорізноманіття: ГІС дозволяють створювати моделі розподілу видів рослин і тварин, аналізувати екологічні ніші та передбачати зміни в популяціях у відповідь на зміни в довкіллі.
  - Моделювання екологічних процесів: моделювання гідрологічних процесів, кругообігу поживних речовин, вуглецю та інших елементів. Це дозволяє зрозуміти, як різні фактори впливають на функціонування лісових екосистем.
  - Сценарне моделювання: прогнозування впливу різних сценаріїв управління та природних змін на лісові екосистеми. Наприклад, моделювання наслідків змін клімату, вирубок лісів чи пожеж.

– *Просторовий аналіз за допомогою ГІС* включає обробку та аналіз географічних даних для виявлення закономірностей, взаємозв'язків та тенденцій у просторі. У лісовому господарстві просторовий аналіз використовується для:

- Картографування лісових ресурсів: створення детальних карт лісових насаджень, типів рослинності, вікової структури лісів та інших параметрів.
- Аналіз просторових закономірностей: виявлення і аналіз просторових закономірностей у розподілі видів, поширенні хворіб та шкідників, впливу антропогенних факторів.
- Оцінка екологічних ризиків: оцінка ризиків, пов'язаних з природними катастрофами (наприклад, пожежі, повені), та антропогенними впливами (вирубка лісів, урбанізація).

ГІС-технології забезпечують створення різноманітних карт і візуалізацій, які можуть бути інтерактивними та багатoshаровими. Це дозволяє наочно представити складні просторові дані та взаємозв'язки. При цьому, аналіз просторових даних включає різні методи, такі як буферний аналіз, кластерний аналіз, аналіз сусідства, що дозволяють виявляти просторові взаємозв'язки та закономірності. Також ГІС-технології інтегруються з даними дистанційного зондування (супутниковими та аерофотознімками), GPS-технологіями, базами даних, що дозволяє отримувати комплексну інформацію для аналізу та прийняття рішень.

Таким чином, ГІС-технології є невід'ємною частиною сучасного лісового господарства, забезпечуючи інструменти для моделювання екосистем та проведення просторового аналізу. Вони сприяють точному моніторингу стану лісових ресурсів, виявленню екологічних ризиків, прогнозуванню змін і підтримці прийняття рішень, спрямованих на сталий розвиток та збереження природних ресурсів.

Ефективним методом дослідження стану лісів і їхньої еволюції з часом є використання повітряного лазерного сканування (з англ. *Airborne Laser*



*Scanning, ALS*), яке також називають LiDAR (Light Detection and Ranging) (Badia & Gisbert, 2020; Ozkan, Demirel, Ozdemir, Saglam & Mert, 2020). Технологія LiDAR є сучасною технологією дистанційного зондування, яка використовує лазерні імпульси для отримання тривимірних зображень та вимірювань поверхні Землі, включаючи лісовий покрив. Ця технологія стала незамінним інструментом у лісовому господарстві для оцінки структури лісу, висоти дерев та біомаси. LiDAR дозволяє детально оцінити структуру лісового покриву, включаючи його вертикальну та горизонтальну компоненти. Дані LiDAR надають інформацію про різні яруси лісу, від верхівок дерев до нижнього ярусу підліску. Це дозволяє оцінювати щільність та розподіл рослинності на різних висотах. LiDAR також дозволяє створювати точні карти розташування дерев, оцінювати їх просторове розташування та щільність насаджень.

Однією з основних переваг LiDAR сканування є висока точність вимірювань висоти дерев завдяки своїй здатності проникати крізь крони дерев і відбиватися від різних частин дерева, включаючи верхівки та стовбури. Системи LiDAR можуть охоплювати великі площі, що дозволяє проводити вимірювання висоти дерев на масштабних територіях за короткий час. Дані LiDAR є цінними для оцінки біомаси лісу, що є важливим для розуміння вуглецевого циклу та управління лісовими ресурсами: LiDAR також дозволяє вимірювати об'єм деревної маси, що є основою для оцінки біомаси. Дані про структуру крони та стовбура дерев використовуються для розрахунків. При цьому, лідарні дані можуть бути корельовані з наземними даними про біомасу, що дозволяє створювати моделі для точного прогнозування біомаси на великих територіях.

До основних переваг даної технології можна віднести наступні (Budei, St-Onge, Hopkinson, & Audet, 2018; Liu, Lim, Shen & Yebra, 2019; Dai, Yang, Dong & Shaker, 2018; Dalla Corte, Souza, Rex, Sanquetta, Mohan, Silva, ... & Broadbent, 2020).

- *Висока точність.* LiDAR забезпечує високу точність вимірювань висоти дерев, структури крони та біомаси.
- *Детальність даних.* Дані LiDAR містять детальну інформацію про вертикальну та горизонтальну структуру лісу, що важливо для екологічних досліджень та управління лісовими ресурсами.
- *Швидкість та ефективність.* Лідарне сканування дозволяє швидко охоплювати великі території, що є ефективним для моніторингу лісових екосистем.

Хоча в останні роки використання LiDAR для окреслення окремих дерев зросло через те, що він надає інформацію дуже високої роздільної здатності як по горизонталі, так і по вертикалі, повне використання даних та покращення процедур для вилучення інформації з високою точністю залишається складним завданням (Mohan, de Mendonça, Silva, Klauberg, de Saboya Ribeiro, de Araújo, ... & Cardil, 2019; Kukkonen, Maltamo, Korhonen & Packalen, 2019; Murray, Gullick, Blackburn, Whyatt & Edwards (2019; Dong, Zhang, Ding & Fan, 2020).

Таким чином технологія LiDAR є надзвичайно важливим інструментом у сучасному лісовому господарстві. Вона забезпечує точні та детальні дані про структуру лісового покриву, висоту дерев і біомасу, що сприяє ефективному управлінню лісами, моніторингу змін у лісових екосистемах та оцінці впливу на кліматичні процеси. Використання цієї технології сприяє збереженню лісових ресурсів та підтримці сталого розвитку.

Проблеми і виклики у дослідженні стану лісів вимагають комплексного підходу та співпраці між науковцями, урядами, бізнесом і громадськістю. Розуміння та врахування впливу зміни клімату, антропогенних факторів та економічних аспектів є ключовими для розробки ефективних стратегій управління та збереження лісових екосистем. Лише такий підхід може забезпечити довгострокове збереження лісів та їхні екологічні, соціальні та економічні функції.

### 1.3. Основні причини засихання лісів

Засихання лісів є однією з актуальних екологічних проблем в Україні, яка щороку набуває все більшого масштабу та викликає занепокоєння серед екологів, лісівників і суспільства загалом. Це явище зумовлене комплексом природних і антропогенних факторів, що впливають на стан лісових екосистем та їх здатність до самовідновлення.

Зокрема серед чинників, які впливають на стан і ріст лісових насаджень виділяють такі: абіотичні, біотичні та антропогенні (Радченко, Тарабан, & Карпець, 2023; Пузріна, Мешкова, Миронюк, Бондар, Токарева, & Бойко, 2021).

До абіотичних чинників відносять погодні умови, стан ґрунту, впливо освітлення, вітру, снігу, граду, блискавки, зміни рівня ґрунтових вод, посухи, повені. Такі чинники можуть прямо пошкоджувати дерева (вітровали, буреломи, сніголами) або ослабляти їх, що робить дерева вразливими до комах і хвороб.

До біотичних чинників відносять негативний вплив живих організмів, зокрема конкурентну взаємодію з іншими рослинами за світло, воду та поживні речовини, а також хвороби, які передаються від заражених до здорових дерев. Тварини, такі як лосі та гризуни, можуть руйнувати тканини дерев, а комахи можуть переносити збудників хвороб.

До антропогенних чинників належать чинники, пов'язані з людською діяльністю: рекреаційне навантаження, промислове забруднення, зміни ґрунтових вод через промисловість, а також пожежі, що здебільшого є наслідком людської діяльності. Антропогенні чинники також охоплюють нераціональне ведення лісгосподарської діяльності, зокрема висаджування насаджень у непридатних для них умовах, порушення режимів вирощування та інші помилки в управлінні.

Масове засихання хвойних лісів переважно пов'язують зі зміною клімату, зокрема глобальним потеплінням. Підвищення температури повітря та зменшення кількості опадів призводить до зниження рівня ґрунтових вод,

що послаблює дерева та робить їх більш вразливими до нападів шкідливих комах і збудників хвороб.

Якщо раніше патологічні процеси спостерігалися переважно у старіших соснових лісах (віком понад 80 років), то нині від засихання потерпають і середньовікові насадження, а також і молоді дерева (Селінний & Корма, 2019). Перші осередки засихання хвойних дерев в Україні зафіксували в Житомирській області у 2011 році. Станом на 2015 рік зона ураження перемістилася на північний захід, а вже в 2016 році були пошкоджені соснові ліси в більшості північно-західних областей України. Наприкінці 2017 року засихання сосни, спричинене шкідниками, виявили також у центральних областях України, а весняне обстеження 2018 року показало поширення осередків у лісостепову зону на Лівобережжі.

Сьогодні масове засихання соснових лісів охоплює Волинську, Житомирську, Київську, Львівську, Рівненську, Хмельницьку, Черкаську та Чернігівську області, і процес продовжує поширюватися (Барков, 2022; Кавун & Логінова, 2016; Логінова, 2018; Жуковський, Краснов, Іванюк, Курбет, & Зборовська, 2022; Андреева, Гузій, & Вишневський, 2018; Андреева, Вишневський, & Болюх, 2019).

Кліматичні та географічні особливості України сприяють значному поширенню шкідників і хвороб, відповідно лісові масиви потребують спеціальних захисних заходів. Підвищення середньої температури та зниження рівня ґрунтових вод негативно впливає на хвойні дерева з поверхневою кореневою системою, які не витримують високих температур. Ті ж фактори спричиняють засихання дуба, граба та ясеня пристигаючого та стиглого віку.

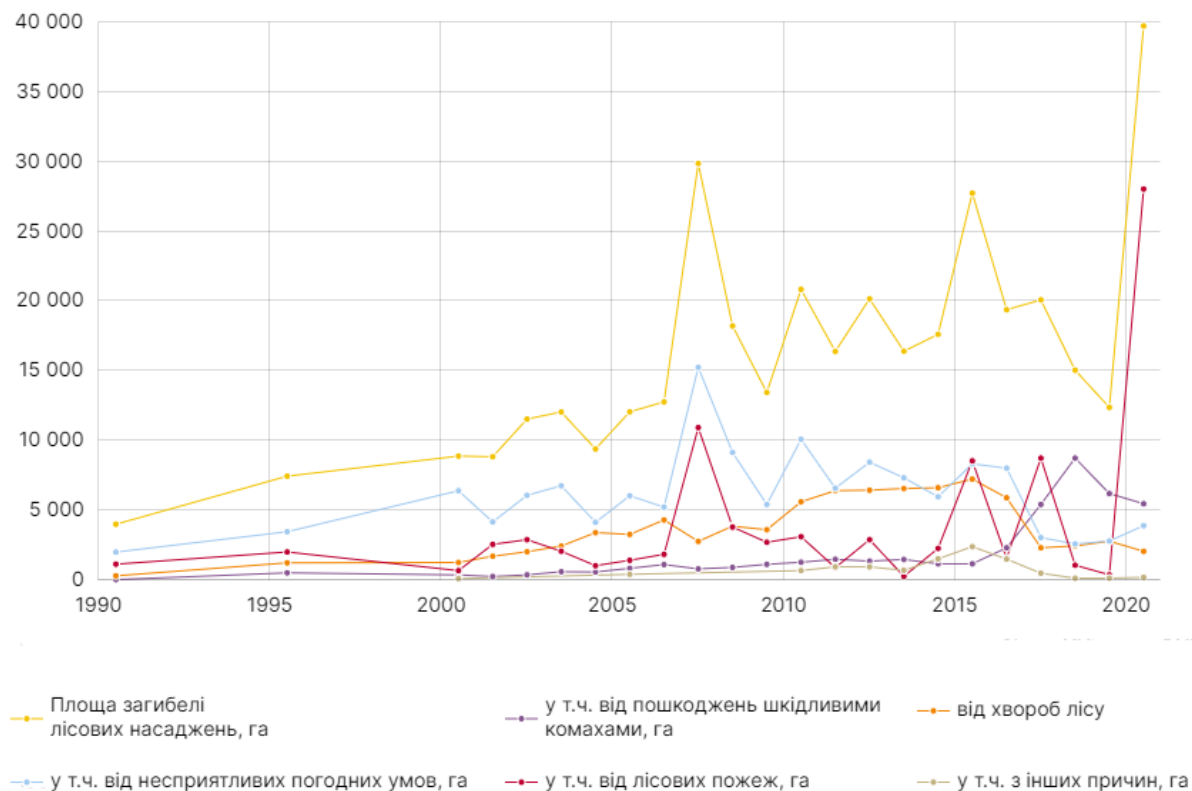
Найпоширенішими серед шкідників є жуки-коріди, явище їхнього поширення отримало назву «біологічна пожежа» (Поліщук, Волошина, & Сятиня, 2019).

Засихання хвойних дерев починається за верхівковим типом: спершу коріди уражає товсті гілки та ділянки стовбура з тонкою корою. Після

проникнення під кору жуки прогризають маточні ходи, відкладають яйця, з яких з'являються личинки. Їхнє живлення викликає зміну кольору хвої — спочатку з зеленого на сіро-зелений, а згодом на рудий, гілки відмирають, і дерево гине.

Спершу всихають окремі дерева, згодом куртини, а потім значні площі лісу. Найчастіше осередки короїдів утворюються в одноярусних, одновікових лісах, зазвичай із двома основними породами штучного походження. Такі насадження є найменш стійкими до дії несприятливих факторів — вітру, грибкових хвороб та пошкоджень комахами.

На рис. 1.5. зображено графік із площами загибелі лісових насаджень від таких причин як пошкодження шкідниками, хвороб лісу, несприятливих погодних умов, пожеж та з інших причин за даними із Статистичних щорічників України за 2007, 2012, 2016 та 2020 роками, які підготовлені Державною службою статистики України (Площа загибелі лісових насаджень за роками, 2023).



**Рис.1.4.** Площа загибелі лісових насаджень (у га) за причинами

У 2020 році загальна площа загибелі лісових насаджень становила 39,756 тис. га, що в 3,21 рази перевищує показник 2019 року. Зокрема, внаслідок пошкоджень шкідниками було втрачено 5,492 тис. га (на 11,75 % менше, ніж у 2019 році); через хвороби лісу – 2,079 тис. га (на 25,96 % менше, ніж у 2019 році); через несприятливі погодні умови – 3,919 тис. га (на 39,12 % більше, ніж у 2019 році); внаслідок лісових пожеж – 28,056 тис. га (в 70,03 рази більше, ніж у 2019 році); з інших причин – 210 га.

У 2019 році загинуло 12,398 тис. га лісових насаджень, що на 17,73 % менше, ніж у 2018 році. З них через пошкодження шкідниками загинуло 6,223 тис. га (на 28,98 % менше, ніж у 2018 році); через хвороби лісу – 2,808 тис. га (на 13,96 % більше, ніж у 2018 році); через несприятливі погодні умови – 2,817 тис. га (на 8,14 % більше, ніж у 2018 році); від лісових пожеж – 395 га (на 63,59 % менше, ніж у 2018 році); з інших причин – 155 га (на 1,31 % більше, ніж у 2018 році). (Площа загибелі лісових насаджень за роками, 2023)

У 2018 році площа загибелі становила 15,069 тис. га, що на 25,07 % менше порівняно з 2017 роком. Зокрема, через ураження шкідниками було втрачено 8,762 тис. га (на 61,1 % більше, ніж у 2017 році); через хвороби лісу – 2,464 тис. га (на 5,57 % більше, ніж у 2017 році); через несприятливі погодні умови – 2,605 тис. га (на 15,01 % менше, ніж у 2017 році); через лісові пожежі – 1,085 тис. га (на 87,62 % менше, ніж у 2017 році); з інших причин – 153 га (на 70 % менше, ніж у 2017 році).

Відомості про загибель лісових насаджень в Україні за 2010-2022 роки за даними Державної служби статистики України подано в ДОДАТКУ А.

Масове поширення осередків короїдів набуває загрозливих масштабів у більшості європейських країн. За останнє десятиріччя засихання хвойних лісів через пошкодження верхівковим короїдом були зафіксовані в Білорусі, Польщі, Італії, Німеччині, а також у країнах Скандинавії — Фінляндії та Швеції. Згідно з офіційними звітами та науковими публікаціями європейських дослідників, розширення ареалу стовбурових шкідників є

прямим наслідком кліматичних змін (Hanewinkel, Cullmann, Schelhaas, Nabuurs, & Zimmermann, 2013; Seidl, Schelhaas, Lindner, & Lexer, 2014; Marini, Hauser, Fuhrer, & Cherubini, 2012). У 2018 році ці шкідники зайняли домінуюче положення, охопивши 23% від загальної площі осередків шкідників, збільшивши територію свого поширення в 7,7 рази за останні чотири роки.

У Німеччині, Польщі та Швеції лісівники завчасно вирубують дерева, уражені короїдами, не чекаючи повного засихання дерев, щоб зберегти їхню технічну якість. Такий підхід підтримується як громадськістю, так і природоохоронними організаціями.

У Польщі завдяки розвиненій системі управління та чіткій нормативній базі лісівники мають достатньо повноважень для оперативного запобігання поширенню проблеми у державних лісах. Польський національний лісовий фонд забезпечує накопичення коштів для фінансування заходів із захисту лісів та відновлення без залучення державного бюджету.

У Білорусі влітку 2017 року, через масове засихання лісів на окремих територіях, було введено режим надзвичайної ситуації природного характеру. На площі понад 20 тис. га проведено суцільні санітарні рубки, задіяно понад 5 тисяч осіб, введено тимчасову заборону на планові рубки, а техніку лісгоспів передислоковано на місця санітарних робіт. Також було скорочено час оформлення дозволів на рубки.

У США та Канаді визнали, що хімічний захист лісів від короїда неефективний, адже він недовго перебуває на поверхні кори. Окрім високої вартості, хімікати забруднюють довкілля, тому єдиним ефективним методом залишається ліквідація зон засихання для боротьби з шкідниками та хворобами.

Емпіричні моделі оцінки ризику поширення жука-короїда зазвичай базуються на екологічних факторах, таких як рельєф, клімат та типи ґрунтів. Але не менше значення мають і характеристики лісових насаджень, зокрема їх структура, склад і просторова конфігурація (Overbeck & Schmidt, 2012;

Coops, Waring, Wulder & White, 2009; Seidl, Müller, Hothorn, Bässler, Heurich & Kautz, 2015).

Стан крони дерев є індикатором загального здоров'я окремого дерева чи деревостану. Первинна продуктивність рослинного покриву залежить від здатності крон перехоплювати сонячне світло, оскільки дерева з густою кроною мають кращі умови для фотосинтезу. Погіршення стану крони може сигналізувати про вплив різноманітних чинників — природних або антропогенних, таких як шкідники, хвороби, посухи, зміни рівня ґрунтових вод чи забруднення повітря. Одним з основних показників для оцінки стану лісів у Європі є дефоліація крон (втрата листя або хвої), що відображає загальний дефіцит листя в кроні дерева. Дефоліація є узагальненим показником, який вказує на ступінь пошкодження через інтегральний вплив різних факторів.

Дефоліація належить до загальноєвропейських індикаторів сталого управління лісами, що характеризують стан і життєздатність лісових екосистем (MCPFE, 2002). Визначення рівня дефоліації є обов'язковим для країн, які беруть участь у міжнародному процесі захисту лісів Європи (Міністерська конференція з захисту лісів Європи). Україна також підписала резолюції в рамках ініціативи «Ліси Європи», що вимагає проведення лісового моніторингу згідно з програмою UN-ECE/ICP Forests як обов'язкової форми співпраці європейських країн.

Для оцінки стану насаджень та порівняння на моніторингових ділянках дерева поділяють за рівнем дефоліації на п'ять класів: непошкоджені (0-10% дефоліації), слабо пошкоджені (11-25%), середньо пошкоджені (26-60%), сильно пошкоджені (61-99%) та всохлі (100%) (Ukonmaanaho, Pitman, Bastrup-Birk, Breda, & Rautio, 2016 ). Згідно з критеріями, дефоліація до 25% вважається природною для фітомаси крони, тоді як понад 25% дефоліації вказує на пошкодження дерева.



Згідно постанови Кабінету Міністрів України від 27 липня 1995 р. № 555 «Про затвердження Санітарних правил в лісах України» виділяють 6 категорій стану дерев, перелік яких наведено у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4

### Категорії стану дерев

Категорія стану дерев	Ознаки стану дерев	
	хвойних	листяних
I - без ознак ослаблення	Хвоя та листя зеленого кольору, крона густа. Приріст за поточний рік відповідає нормі для породи, віку, сезону і умов зростання. Стовбури та кореневі лапи без видимих пошкоджень.	
II - ослаблені	Крона середньої густоти, хвоя зелена. Приріст у висоту зменшений не більше ніж на половину норми. Можливі незначні механічні пошкодження корневих лап або стовбурів (до 1/3 периметра), невеликі рани чи напливи (до четвертини периметра стовбура). У молодих і середньовікових насадженнях об'їдання хвої або листя до 30%, у стиглих та перестійних – до 20%.	Крона середньої густоти, листя зелене. Приріст зменшений до половини нормального рівня. Дрібні механічні пошкодження корневих лап або стовбура (до четвертини периметра). Можуть спостерігатися поодинокі водяні пагони, ракові утворення, нахил стовбура до 10°. Ураження листя борошнистою россою - до 75%, об'їдання листя - до 25%
III - дуже ослаблені	Хвоя зелена, крона ажурна, хвоя укорочена більш ніж на половину звичайної довжини. Приріст значно зменшений. Є поодинокі сухі скелетні гілки в середній частині крони, наявні кущі омели. Механічні пошкодження або ракові утворення охоплюють від одної до двох третин периметра стовбура. Нахил стовбура до 30°, злам верхівки до 2/3 живої крони, пошкодження кори із загибеллю камбію до 3/4 периметра. Об'їдання хвої шкідниками в молодих і середньовікових насадженнях становить 31–90%, у стиглих та перестійних – 21–70%.	Листя світло-зелене, дрібне, крона ажурна. Приріст мінімальний або повністю відсутній. У різних частинах крони спостерігаються поодинокі сухі скелетні гілки. Ракові утворення та механічні пошкодження стовбура або корневих лап займають до половини периметра. Стовбури нахилені на 20–30° від вертикальної осі. Верхівка має злам, що не перевищує 2/3 довжини живої крони. У кроні помітні численні водяні пагони та кущі омели.

		Листя уражене борошнистою росою на 76–100%. На гілках і стовбурах спостерігається соковиділення. Об'їдання листя шкідниками становить до 90% у молодих, середньовікових і пристиглих деревостанах, та до 70% у стиглих і перестійних насадженнях.
IV - відмираючі	Хвоя світло-зелена або жовтувата, крона дуже ажурна. Приріст відсутній. Більше половини скелетних гілок засохли, Механічні пошкодження кореневих лап або стовбурів охоплюють понад 2/3 їхнього периметра. Ракові утворення займають більше 2/3 периметра стовбура. Обгоряння або пошкодження кореневої шийки, із загибеллю камбію, охоплює більше половини периметра стовбура; нагар на стовбурі доходить до нижньої частини крони. Злам верхівки перевищує половину довжини крони, або відламано 100% живих гілок. Дерева з дуплами, плодовими тілами дереворуйнівних грибів або заселені стовбуровими шкідниками, що спричинило локальне відшарування кори. Дефоліація становить понад 90% у молодих і середньовікових насадженнях, і понад 70% у пристиглих, стиглих та перестійних. Ураження омелою охоплює понад 30% крони. Пошкодження кореневої системи, значний нахил стовбура (понад 30° від вертикалі) у нижній або середній частині, а також дугоподібна форма стовбура.	Крона сильно проріджена. Приріст відсутній. Листя дрібне, жовтіє, засихає або вже засохло на понад 2/3 крони. Механічні пошкодження стовбура чи кореневих лап, ракові утворення, що охоплюють понад 2/3 периметра. Нахил стовбурів перевищує 30 градусів від вертикалі. Зламано понад 2/3 верхньої частини крони. Наявність слідів стовбурових шкідників. Присутність плодових тіл дереворуйнівних грибів або дупел на стовбурі. Понад половину крони вражено омелою. Дерева з пошкодженою кореневою системою, нахилом нижньої чи середньої частини стовбура понад 30 градусів від вертикалі, або з дугоподібно вигнутими стовбурами.
V - свіжий сухостій	Хвоя руда. Відбувається часткове опадання кори. Дерева заселені або пошкоджені стовбуровими шкідниками. Багато дерев із зламаними стовбурами.	Листя засохло або відсутнє. Дерева уражені або пошкоджені стовбуровими шкідниками. Багато дерев зі зламаними стовбурами.

VI - старий сухостій	Хвоя, листя та гілки другого та третього порядків відсутні. Відбувається опадання кори, під якою утворюється грибниця дереворуйнівних грибів.
----------------------	---

Пошкодження та засихання соснових лісів призводить до втрати важливого джерела кисню та середовища існування для багатьох видів тварин і птахів, а також означає втрату матеріального ресурсу — деревини.

Для запобігання подальшим втратам економічно вигідно своєчасно видаляти з лісу дерева, уражені короїдом і приречені на загибель, поки хвоя ще світло-зелена або жовта, коли пошкоджена лише верхівка дерева. Якщо ж хвоя вже набула рудого кольору, а ознаки засихання стали явними, то деревина втратила якість, зазвичай вже уражена іншими комахами і дереворуйнівними грибами, а шкідники поширились вже і на сусідні дерева.

Для захисту лісів в Україні створена спеціалізована лісозахисна служба, яка підпорядковується Держлісагентству та діє на основі семи державних спеціалізованих лісозахисних підприємств. Основні завдання служби включають моніторинг і облік шкідників та хвороб, проведення лісопатологічних обстежень, організацію заходів із захисту лісів та надання методичної підтримки лісівникам на місцях.

Пріоритетним напрямком роботи спеціалізованої лісозахисної служби є розробка та впровадження біологічних методів боротьби з шкідниками, які є безпечними для людей і довкілля, особливо в густонаселених районах і лісах, де заборонено використання хімічних засобів. Нераціональне використання лісів Карпатського регіону в минулому, заміна корінних смерекових лісів на менш стійкі деревостани, інтенсивне ведення лісового господарства, техногенне забруднення та рекреаційне навантаження значно знизили стійкість гірських лісів, і тим самим підвищили їхню вразливість до хвороб і шкідників (Об'єктивна інформація щодо лісів, 2024).

Науковцями, лісівниками та екологічною спільнотою проведено численні заходи, включно з круглими столами, науково-практичними конференціями, семінарами та нарадами, де активно обговорювали проблему інтенсивного засихання лісів. Зокрема, у Києві у 2019 році відбулась дводенна Міжнародна науково-практична конференція «Соснові ліси: сучасний стан, існуючі проблеми та шляхи їх вирішення», організаторами якої були Національні академії наук України та Білорусі. В роботі конференції взяли участь науковці, представники міжнародних організацій, зокрема Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН, органів державної влади, закладів освіти, природо-охоронних установ та громадськості, а також фахівці лісових господарств з України, Білорусі, Німеччини, Польщі та Австрії.

На сьогодні лісопатологічна ситуація в Україні залишається напруженою, що потребує постійного контролю та швидкого реагування для запобігання масовому ураженню лісових насаджень шкідниками та хворобами.

Важливим завданням є посилення нагляду, обстеження та моніторинг у зонах засихання соснових насаджень. Зокрема, для виявлення та фіксації осередків засихання хвойної рослинності доцільним є використання даних дистанційного зондування Землі та засобів ГІС, які дозволять вчасно виявляти осередки із пошкодженою рослинністю та приймати вчасні управлінські рішення.

#### **1.4. Висновки до розділу 1**

1) У розділі 1 проведено загальну характеристику лісів України, визначено за якими основними законами та розпорядженнями здійснюється управління та ведення лісового господарства.

2) Проаналізовано основні причини засихання лісів, які включають як природні фактори (посухи, зміни рівня ґрунтових вод), так і антропогенні (пошкодження шкідниками та патогенами, забруднення атмосфери). Це

підтверджує актуальність і необхідність оперативного моніторингу лісів для своєчасного виявлення проблем і їхньої локалізації.

2) Проаналізовано можливості використання даних дистанційного зондування Землі та ГІС-технологій для вирішення ключових проблем лісівництва та забезпечення ефективного управління лісовим господарством України. Встановлено, що застосування сучасних технологій дистанційного зондування та ГІС у моніторингу лісів відкриває нові можливості для підвищення ефективності управління лісовими ресурсами, дозволяє виявляти та локалізувати проблемні ділянки й забезпечує основу для своєчасного реагування на загрози екологічної стабільності лісів.

## РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІСОВИХ УТВОРЕНЬ ЗА СПЕКТРАЛЬНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

### 2.1. Загальна технологічна схема визначення стану лісів з застосуванням технологій ГІС та ДЗЗ

Методика дослідження складається з трьох основних блоків.

Перший блок — польові дослідження, що включають експедиційні роботи для оцінки стану лісів та вибору тестових ділянок для визначення ступеня засихання хвойних дерев.

Другий блок — аерознімання за допомогою безпілотного літального апарата (БПЛА), що охоплює розрахунок параметрів знімання, прокладання маршрутів і проведення самого знімання.

Третій блок — камеральні роботи, які спершу проводяться на тестових ділянках, а потім результати використовуються для оцінки стану хвойних дерев на всій території лісництва. Завершальним етапом є аналіз отриманих даних.

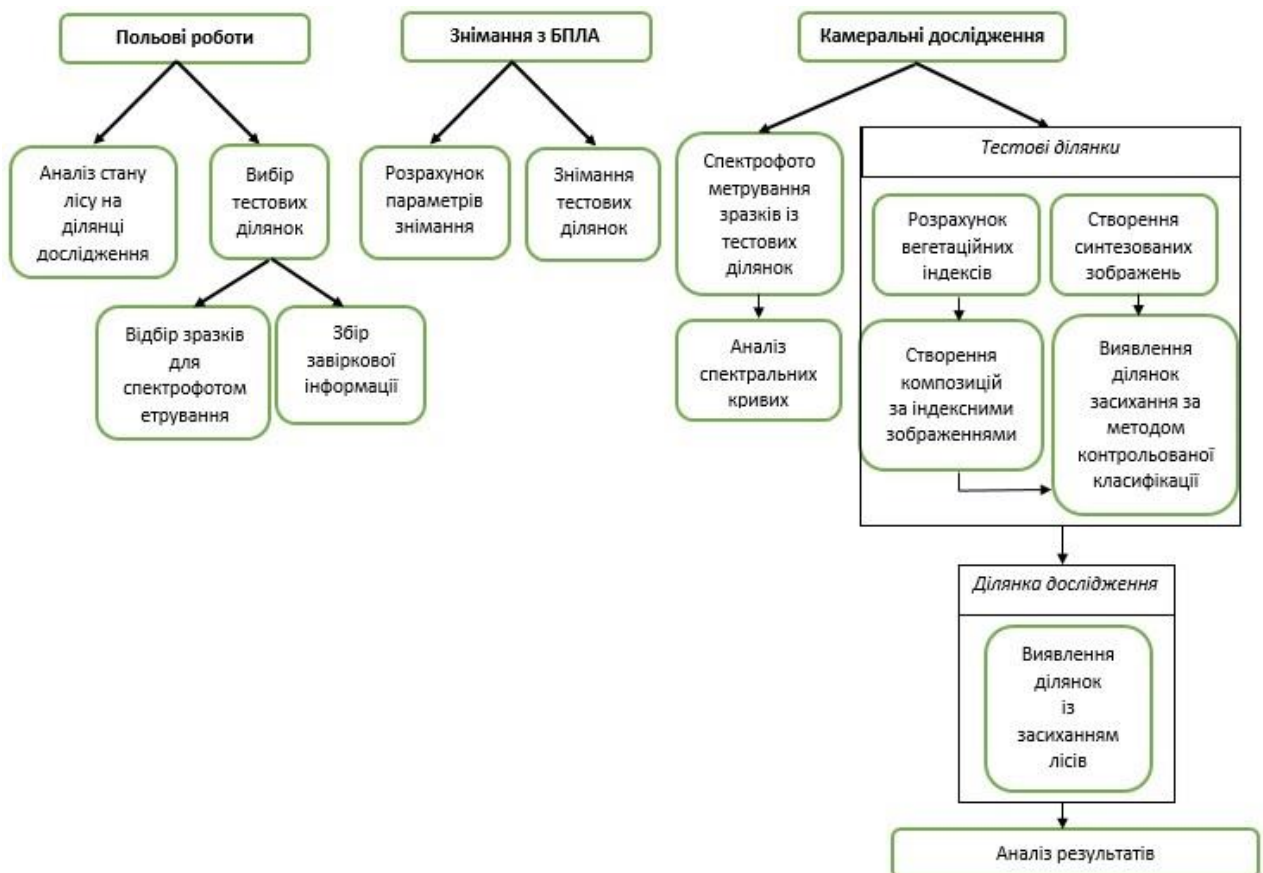


Рис. 2.1. Технологічна схема

## 2.2. Визначення спектральних характеристик хвойної рослинності

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) — це процес спостереження та вимірювання енергетичних і поляризаційних характеристик власного та відбитого випромінювання поверхні суші, океану та атмосфери в різних діапазонах електромагнітних хвиль. Ці дані дозволяють визначати місцезнаходження, властивості та часові зміни природних параметрів і явищ, ресурсів планети, стану довкілля, а також антропогенних об'єктів і утворень.

Фізичною основою процесу дистанційного зондування Землі є властивості електромагнітних хвиль.

Для вивчення земної поверхні дистанційним методами найчастіше використовуються ділянки електромагнітного спектра, які представлено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

### *Розподіл спектральних інтервалів у ДЗЗ*

Спектральний інтервал	Довжина хвилі, λ
Ультрафіолетовий	Менше 0,38 мкм
Видимий	0,38-0,76 мкм
Ближній інфрачервоний	0,76-1,4 мкм
Середній інфрачервоний	1,4-7,5 мкм
Тепловий інфрачервоний	7,5-1,0 мкм
Мікрохвильовий	1-10 мкм
Радіочастотний	2,9 – 3,3 см
	5,7 – 6,1 см
	8 – 12 см
	21 – 30 см
	60 – 70 см

Носієм інформації про земну поверхню при вивченні її дистанційними методами є відбите або власне випромінювання, зафіксовані характеристики якого, в свою чергу, залежать від просторового положення, властивостей і стану об'єкта, що сприяє його дистанційній ідентифікації. Іншими словами, кожен об'єкт на земній поверхні по різному відбиває (а в деяких випадках

випромінює) хвилі різної довжини залежно від своїх особливостей, наприклад, внутрішньої структури або шорсткості поверхні. Відповідно, якщо фіксувати у вигляді кількісних значень та вміти інтерпретувати залежність між довжиною хвилі та особливостями її відбиття / випромінювання різними наземними об'єктами, можна отримати детальну інформацію щодо зовнішніх та внутрішніх властивостей цих об'єктів. Властивості відбиття природних утворень можна характеризувати різними показниками, але основними є: коефіцієнт відбивання; спектральне альbedo; коефіцієнти спектральної та інтегральної яскравостей. Ці параметри залежать від фізико-хімічних, біологічних властивостей об'єктів, ступеня зволоженості, фенологічного складу тощо.

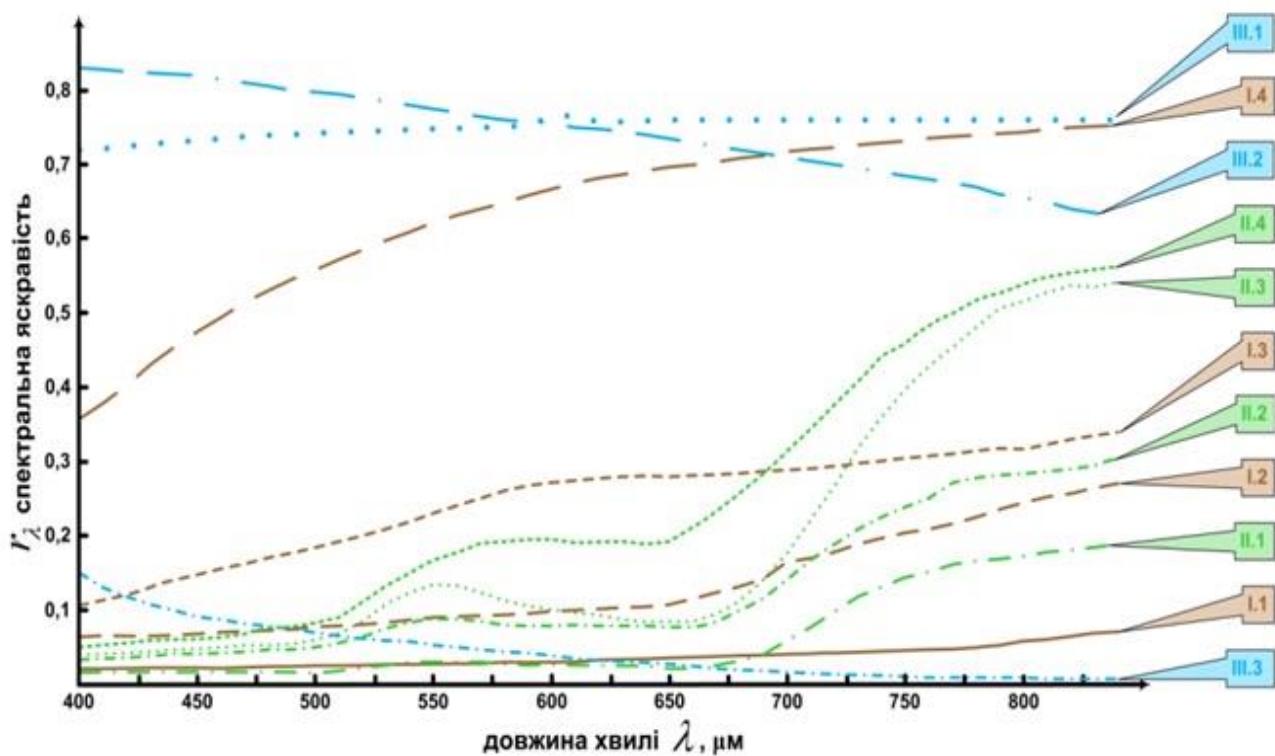
Коефіцієнт спектральної яскравості ( $r_\lambda$ ) – відношення яскравості поверхні  $B$ , що вивчається, в певній частині спектра  $\lambda$  ( $B_\lambda$ ) до яскравості поверхні ідеального розсіювання, яка повністю відбиває випромінювання, що до неї надходить ( $B_0$ ) (2.1) (Кринов, 1947):

$$r_\lambda = \frac{B_\lambda}{B_0} \quad (2.1)$$

Його значення знаходяться між двома умовними екстремумами – абсолютно чорним тілом (хвилі всіх довжин поглинаються і відбивна здатність дорівнює 0 або 0%) та абсолютно білим тілом (хвилі всіх довжин відбиваються і відбивна здатність становить 1 або 100%).

Умовно все різноманіття компонентів ландшафту можна розділити на класи та типи, кожен з яких відрізняється своєю кривою спектральної яскравості (рис 2.2).





*Рис. 2.2. Характерні криві відбивальної здатності основних типів природних утворень (Свідзінська, 2014)*

На цій основі була розроблена та обґрунтована спектрофотометрична класифікація природних утворень:

### Клас I. Ґрунти

- **Tun 1:** Крива рівномірно піднімається у напрямку до червоного кінця спектра ( $r_{\lambda}=0,022-0,071$ ). Це властиво чорноземам, супіщаним ґрунтам та ґрунтовим дорогам.
- **Tun 2:** Крива піднімається рівномірно у видимому спектрі з більш інтенсивним зростанням у ближній ІЧ-ділянці, розташована вище, ніж у першого типу ( $r_{\lambda}=0,064-0,270$ ). Серед представників – опідзолені та суглинкові ґрунти, шосе та деякі будівлі.
- **Tun 3:** Крива має інтенсивний підйом і опуклість на ділянці 550–650 мкм, розташована вище ( $r_{\lambda}=0,168-0,341$ ). Типові об'єкти – піски, пустелі, деякі гірські породи.
- **Tun 4:** Опукла крива з інтенсивним підйомом, значно вище попередніх ( $r_{\lambda}=0,357-0,753$ ), притаманна вапняку, глині та світлим матеріалам.

## Клас II. Рослини

- **Tun 1:** Крива з дуже слабким максимумом у видимій зоні ( $r_{\max}=0,031$ ), з незначним підйомом в ІЧ-діапазоні ( $r_{\text{ir}}=0,189$ ). Представниками є хвойні ліси взимку.
- **Tun 2:** Крива з чіткішим максимумом у видимому спектрі ( $r_{\max}=0,088$ ) і помітно вищим підйомом в ІЧ-ділянці ( $r_{\text{ir}}=0,305$ ). Це хвойні ліси влітку, сухі луки і трав'яні покриви з низькою вологістю.
- **Tun 3:** Крива з різко вираженим максимумом у жовто-зеленій зоні ( $r_{\max}=0,134$ ) та дуже високим підйомом в ІЧ-ділянці ( $r_{\text{ir}}=0,542$ ). Це літні листяні ліси та трав'яні покриви з соковитою рослинністю.
- **Tun 4:** Крива з підйомом по всій зелено-оранжево-червоній зоні ( $r_{\max}=0,190$ ) та значним підйомом в ІЧ-діапазоні ( $r_{\text{ir}}=0,564$ ). Представники – осінні лісові насадження та зрілі польові культури.

## Клас III. Водні поверхні, водойми та сніговий покрив

- **Tun 1:** Нейтральна високо розташована крива ( $r_{\lambda}=0,720-0,760$ ), що відповідає снігу з льодовою кіркою.
- **Tun 2:** Крива з поступовим підйомом у бік фіолетового спектра ( $r_{\lambda}=0,830-0,630$ ), високо розташована над віссю абсцис, властива щойно випавшому снігу.
- **Tun 3:** Крива з інтенсивним підйомом у фіолетовій зоні та поступовим зниженням у червоній ( $r_{\lambda}=0,150-0,007$ ), що характеризує водну поверхню під великим кутом до нормалі, яка відбиває блакить неба.

Наведені спектральні характеристики природних об'єктів застосовуються як до окремих елементів, що утворюють природний покрив даної місцевості, так і до цілих ландшафтів. Наприклад, за наявності снігового покриву весь ландшафт набуває властивостей, притаманних явищам третього класу. Пустелі, випалені степи, оголені скелі та області помірного поясу ранньої весни або пізньої осені, коли переважає жовто-буре забарвлення, можуть бути віднесені до першого класу, а області, укриті зеленою рослинністю - до другого класу.

Ця класифікація враховує лише загальні закономірності, які в кожному конкретному випадку уточнюються залежно від умов освітленості, стану поверхні тощо. Вивчення характеристик хвиль та відбивальної здатності дає теоретичне підґрунтя для практичної інтерпретації об'єктів за набором коефіцієнтів спектральної яскравості в різних зонах спектра (Жиленев, 2009).

В таблиці 2.2. подано узагальнену інформацію щодо прикладного значення вивчення коефіцієнтів спектральної яскравості природних та антропогенних об'єктів земної поверхні в базових спектральних діапазонах ДЗЗ.

*Таблиця 2.2*

**Основні спектральні канали оптико-електронної апаратури  
супутників та їх застосування**

<b>Спектральний канал (довжина хвиль, мкм)</b>	<b>Використання супутникової інформації</b>
Видимий синій (Violet) 0,42-0,55	Отримані дані використовуються в океанографічних дослідженнях та для проведення атмосферних корекцій даних ДЗЗ, зокрема, при розрахунку деяких індексів озеленення.
Видимий синій (Blue) 0,45-0,52	Ділянка призначена для відображення узбережжя, диференціації ґрунту від рослинності та широколистяної від хвойної флори, картографування типів лісу, виявлення штучних споруд. Вона менше підходить для оцінювання вегетації та вивчення хвойних лісів. В ній досить добре фрагментуються структурні гірські породи (наприклад, сланці, фосфати), що сильно розсіюють синє світло в цій зоні, а іноді – в видимій зеленій. Атмосферні ефекти основний внесок роблять у видимій частині спектра – більше 70% розсіяного випромінювання припадає саме на цю ділянку.

<p>Видимий зелений (Green) 0,52-0,60</p>	<p>Ділянка відповідає максимальному коефіцієнту відбиття зеленої (здорової) рослинності та використовується для таксації лісу. Також використовується для ідентифікації штучних об'єктів місцевості.</p>
<p>Видимий червоний (Red) 0,63-0,69</p>	<p>Ділянка використовується для розділення різновидів рослин, оскільки містить смугу поглинання хлорофілу. Зміщення цієї смуги вздовж спектра може застосовуватись для визначення видового складу рослин. Також вона використовується для визначення меж ґрунтів та геологічного оконтурення (покладів, рудного тіла, нафтових полів), штучних об'єктів, при аналізі гірських порід та ґрунтів, багатих залізом, особливо трьохвалентним.</p>
<p>Ближній інфрачервоний (Near InfraRed) 0,76-0,90</p>	<p>Ділянка особливо чутлива до кількості вегетаційної біомаси, представлена на знімку. Використовується для ідентифікації сільськогосподарських ґрунтів та культур, оцінювання врожайності, а також для визначення берегових ліній об'єктів на місцевості (за контрастом води/ґрунту).</p>
<p>Короткохвильовий інфрачервоний (Short Wave Infrared) 1,55-1,75</p>	<p>Ділянка чутлива до вмісту води в рослинності та ґрунтах, оцінювання якого є корисним в стадії плодоношення, вивчення посухи та досліджень стану рослин. Речовина, що містить воду, дає сигнал нижчий ніж сухий матеріал. На ділянках вільних від рослинності в даному діапазоні спектра диференціюється відповідні різноманітні оксиди заліза, що містяться в породах та ґрунтах, та зазвичай в ній добре відображаються вивітрені гірські породи. Ця ділянка – одна з небагатьох в якій можна диференціювати хмари від снігу та льоду (низький сигнал – від снігу, інтенсивний – від хмар).</p>

Тепловий інфрачервоний (Thermal InfraRed) 10,40-12,50	Теплова ІЧ ділянка, що використовується для визначення температури підстильної поверхні, інтенсивності теплоти об'єктів. Ця ділянка спектра призначена для оцінювання врожаю «на корені», виявлення та аналізу навантажень на рослинність, застосування інсектицидів, та для визначення теплового забруднення. Може також використовуватись для виявлення геотермальної активності. Має переваги для відображення темних породоутворюючих мінералів з високою щільністю.
Короткохвильовий інфрачервоний (Middle InfraRed) 2,08-2,35	Ділянка є важливою для виділення типів геологічних порід. Вона була відібрана через наявність потенціалу для розрізнення гірських порід, змінених гідротермальних зон та інших досліджень з цілями геологорозвідки. У цій ділянці спектра багаті на кремній матеріали, пил в повітрі та оголені ґрунти часто дають досить високий сигнал. Ділянка важлива для виділення меж ґрунтів, а також аналізу ступеня зволоженості ґрунтів та рослинності.

Якщо використовувати певний спектральний діапазон, що відповідає стану рослинності, то переходимо до інтегральної залежності (2.2):

$$r_{\lambda} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{0\lambda} d\lambda} \quad (2.2)$$

Спектральні характеристики рослин здебільшого визначаються здатністю листя відбивати, поглинати та пропускати сонячне світло, що залежить від довжини хвилі. Основні особливості відбивної здатності рослинності проявляються під час переходу від видимого спектра до ближнього інфрачервоного діапазону. У видимій ділянці спектра відбувається значне поглинання світла, з піком відбиття в зеленій зоні спектра, що обумовлює зелений колір листя. Цей процес відбувається в хлорофілі — тканині листка, де хлорофіл поглинає світло в синьому та

червоному діапазоні і відбиває зелені промені. У ближньому ІЧ-діапазоні рослини демонструють максимальне відбиття, яке залежить від типу рослинності.

Із подовженням хвилі до 1,3–2,5 мкм відбивна здатність зелених рослин знижується, оскільки сонячна енергія поглинається водою в структурі листя, з двома характерними мінімумами (приблизно 1,43 і 1,93 мкм), що відповідає смугам поглинання води. Загальний вміст води в листі впливає на форму спектральної кривої: менший вміст води призводить до підвищення відбиття у видимій зоні і зниження в ближньому ІЧ-діапазоні.

Особливості спектральної характеристики зеленої рослинності відображаються як на рівні окремого листка, так і на рівні рослинних масивів, незалежно від виду. Водночас різні види рослин мають унікальні відмінності в спектральній кривій, що дає можливість розрізняти рослини та оцінювати їх стан. Спектральні характеристики змінюються протягом вегетаційного періоду, причому кожен вид рослин має особливі періоди, коли їх спектральні властивості найвиразніші. Ці періоди є оптимальними для дослідження з використанням даних дистанційного зондування Землі.

Рослинність є найбільш чутливим елементом екосистем, на її розвиток і фізіологічний стан значно впливають як довгострокові природні чинники (кліматична зона, ландшафт, тип ґрунту), так і короткострокові погодні умови (опаді, температура, сонячна радіація). Оптимальні рівні опадів і тепла сприяють швидкому зростанню біомаси, тоді як нестача вологи пригнічує рослинність і підвищує ризик пожеж. Рослини реагують на зміну умов зміною пігментації, мезофільної структури, вмісту вологи в листі. В екстремальних умовах, як-от зниження рівня ґрунтових вод або засолення, змінюється структура рослини, що викликає різке зниження відбивної здатності в ближньому ІЧ-діапазоні.

Спектральні коефіцієнти широко використовують для точного землеробства, стану лісових покривів, забруднення водойм та інших екологічних завдань.

Для ефективного використання спектральних ділянок відбиття під час польової експедиції зібрано зразки різних типів хвойної рослинності. У дослідженні застосовували спектро радіометр ASD FieldSpec-3 FR (рис. 2.3). Роботи виконано на базі державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України».



**Рис. 2.3.** Загальний вигляд спектро радіометра ASD FieldSpec-3 FR

Спектро радіометр ASD FieldSpec-3 FR працює в спектральному діапазоні 350–2500 нм. Інтервал відліку становить 1,4 нм у межах довжин хвиль 350–1000 нм та 2,0 нм у діапазоні 1000–2500 нм. Спектральна розрізненість приладу дорівнює 3,0 нм на довжині хвилі 700 нм і 10 нм на довжинах хвиль 1400 нм та 2100 нм.

Основні характеристики спектро радіометра ASD FieldSpec-3 FR наведено у таблиці 2.3 (Польовий спектро радіометр ASD FieldSpec® 3 FR., б. д.).

*Таблиця 2.3*

**Основні характеристики спектро радіометра ASD FieldSpec-3 FR**

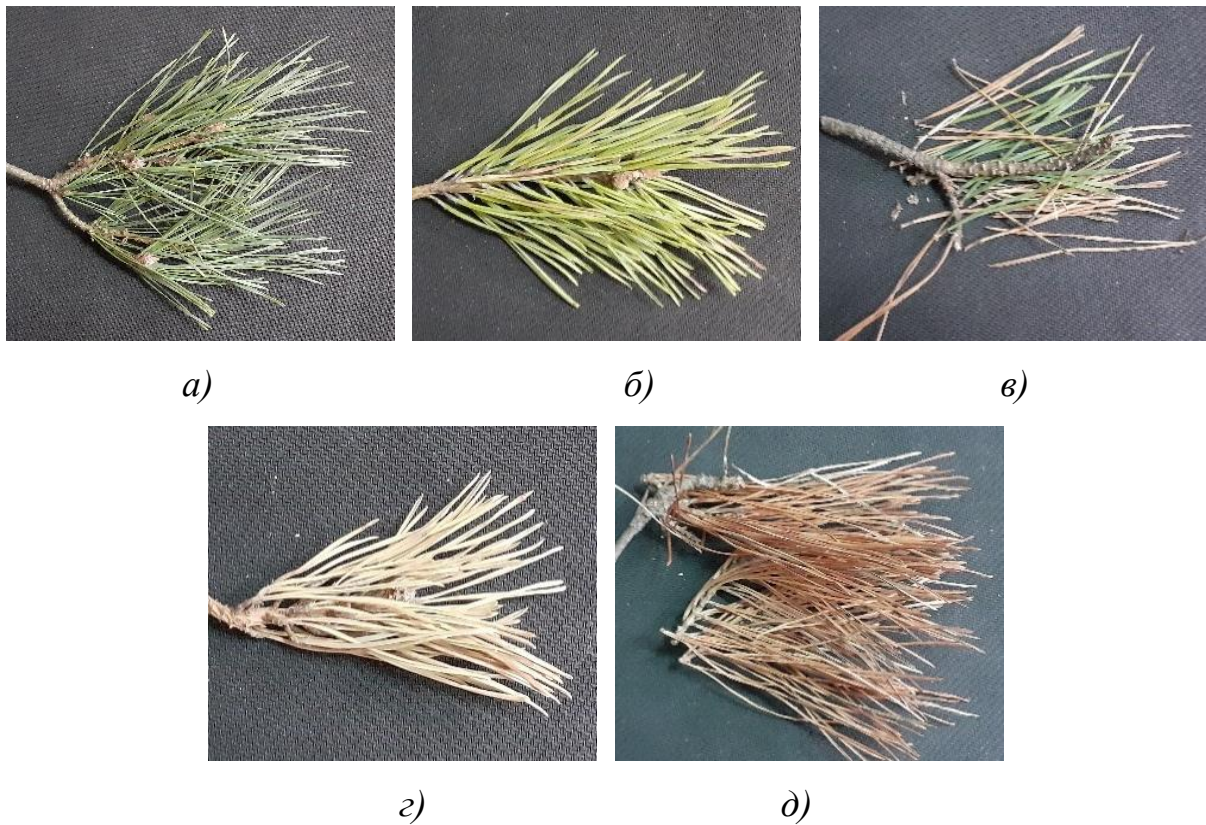
Спектральний діапазон	350-2500 нм
Інтервал відліку	1,4 нм у діапазоні довжини хвиль 350-1000 нм і 2,0 нм у діапазоні довжини хвиль 1000-2500 нм

Спектральна розрізненність	3,0 нм при 700 нм та 10 нм при 1400 і 2100 нм
Яскравість, еквівалентна шуму (NeDL), для стандартного волоконно-оптичного кабелю довжиною 1,5 м становить	$1,4 \cdot 10^{-9}$ Вт/см <sup>2</sup> · нм · при 700 нм; $2,4 \cdot 10^{-9}$ Вт/см <sup>2</sup> · нм · при 1100 нм ; $8,8 \cdot 10^{-9}$ Вт/см <sup>2</sup> · нм при 2100 нм
Вага	спектрорадіометр - 5,6 кг, блок живлення - 1,2 кг, рюкзак -2,4 кг, керуючий комп'ютер - 1,6 кг
Габарити	спектрорадіометр - 12,7x35,6x29,2 см, блок живлення - 14x8,9x3,8 см, рюкзак - 30,5x61x10,2 см, керуючий комп'ютер 30,5x21,6x3,8 см
Температурний діапазон роботи	0...+40°C - у режимі експлуатації; - 15...+45°C - при зберіганні

Спектрорадіометр ASD FieldSpec-3 FR оснащений трьома окремими датчиками, що дозволяють досягти високої точності та забезпечують можливість вибору діапазону користувачем. Кожен із цих трьох датчиків працює як окремий спектрометр, а оптоволоконний кабель містить джгути, впаяні безпосередньо в спектрометри. Перший датчик використовує нерухому голографічну дифракційну ґратку для діапазону 350–1050 нм і 512-елементну кремнієву фотодіодну лінійку з фільтром, що забезпечує оптимальну вибірку, чутливість та температурну стабільність у цьому діапазоні. Другий і третій датчики оснащені голографічними дифракційними ґратками для швидкого сканування, градієнтними InGaAs-фотодіодами з термоохолоджувачами та блокувальними фільтрами (Донец і ін., 2014).

На рис. 2.4 подано зразки хвойної рослинності різного типу, відібрані під час експедиції у червні 2019 р.

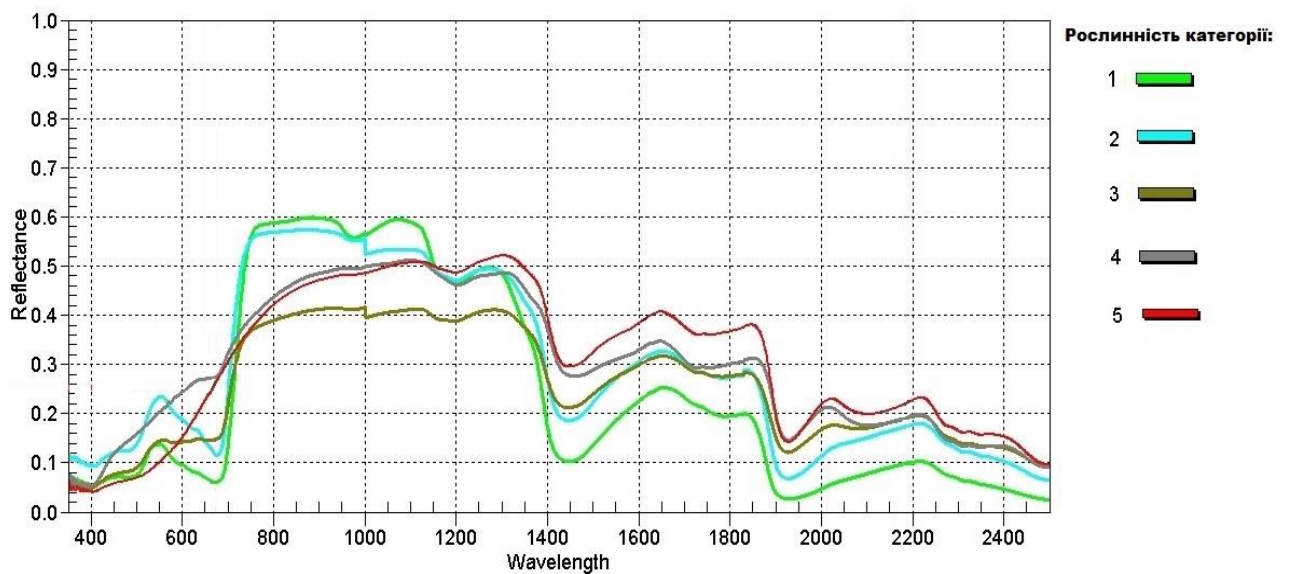




**Рис. 2.4.** Зразки відібраної хвойної рослинності:

а) 1 категорія (здорова); б) 2 категорія (ослаблена); в) 3 категорія (дуже ослаблена); г) 4 категорія (засихаюча); д) 5 категорія (свіжий сухостій)

В результаті спектрофотометрування отримано графік спектральних кривих для різних видів хвойної рослинності (рис. 2.5).



**Рис. 2.5.** Графік спектральних кривих для хвойної рослинності різних категорій

Аналіз спектральних кривих (рис. 2.5) показує, що для ідентифікації різних типів рослинності ефективними є не лише ділянки в області червоного краю, але й середній інфрачервоний діапазон (приблизно 1400-1900 нм). Як видно з графіка, здорова рослинність демонструє максимальне відбиття у діапазоні 700-1150 нм, тоді як від 1150 до 2400 нм найвища відбивна здатність спостерігається у повністю сухої рослинності. Засихаюча рослинність (категорії 2, 3, 4) не демонструє різких змін коефіцієнта яскравості в червоному краї, а має більш плавну криву в діапазоні 500-800 нм, що за формою більше відповідає характеристикам ґрунтів. Середня інфрачервона ділянка спектра показує зміни вологості рослинності, а також структури рослинного покриву та листя. Відбиття в ближньому ІЧ-діапазоні залежить від внутрішньої структури листка, але не від рівня його вологості. Отже, поєднання цих діапазонів дозволить підвищити точність визначення вологості рослинності (Сесцато et al., 2001).

Детальний аналіз спектральних кривих дозволяє розрізнити лише три види хвойної рослинності – здорову, частково пошкоджену та усохлу.

### **2.3. Застосування вегетаційних індексів для ідентифікації хвойних лісів**

Веgetаційний індекс — це кількісний показник, розрахований на основі відношення або різниці спектральних відбивних здатностей рослинності в різних діапазонах електромагнітного спектра (зазвичай червоного і ближнього інфрачервоного). Він відображає біофізичні параметри рослинності, такі як густина, здоров'я, вологість і біомаса, і широко використовується для моніторингу стану рослинності на основі даних дистанційного зондування Землі. Веgetаційні індекси застосовують для оцінки стану рослинності, її здоров'я, вологості та біомаси. Вони широко використовуються в екології, сільському господарстві, лісовому господарстві, а також для моніторингу змін у земному покриві.

Нижче наведемо короткий огляд найбільш поширених вегетаційних індексів (Бардиш, Б., & Бурштинська, Х., 2014; Бурштинська, Х. В., Заяць, І. В., & Денис, Ю. В., 2018; Бурштинська, Х., Станкевич, С., Денис, Ю., & 2019).

### Базові вегетаційні індекси

- Відносний вегетаційний індекс (Ratio VI, RVI) (2.3):

$$RVI = (NIR/RED) \quad (2.3)$$

Індекс може набувати значень у діапазоні від 0 до нескінченності. Для зеленої рослинності значення вегетаційного індексу перевищують 1 і збільшуються зі зростанням кількості зеленої фітомаси (зазвичай становлять від 2 до 8). Розробники - Birth і McVey, 1968; Jordan C.F., 1969; Rouse J.W. і ін., 1973; Tucker C.J. і ін., 1979.

- Нормалізований різницевий вегетаційний індекс (Normalized Difference VI, NDVI) (2.4):

$$NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED) \quad (2.4)$$

Індекс може набувати значень від -1 до 1. Для рослинності індекс NDVI набуває додатних значень, зазвичай від 0,2 до 0,8. Вперше описаний Rouse B.J. і ін., 1973, концепція вперше представлена Kriegler F.J. і ін., 1969.

- Удосконалений вегетаційний індекс (Enhanced Vegetation Index, EVI) (2.5):

$$EVI = \frac{NIR - RED}{NIR + C_1 \cdot RED - C_2 \cdot BLUE + L} (1 + L) \quad (2.5)$$

Коефіцієнти  $C_1$ ,  $C_2$  і  $L$  визначені емпірично і дорівнюють 6,0, 7,5, і 1,0 відповідно (Huete і ін., 1997). Індекс може приймати значення від -1 до 1. Для зеленої рослинності - значення від 0,2 до 0,8 Розробники - Rouse J.W. і ін., 1973; Tucker C.J., 1979; Jackson R.D. і ін., 1983; Kriegler F.J. і ін., 1969; Sellers P.J., 1985.

- Інфрачервоний вегетаційний індекс (Infrared Percentage VI, IPVI) (2.6):

$$IPVI = NIR/(NIR + RED) = (NDVI + 1)/2 \quad (2.6)$$

Індекси IPVI та NDVI є функціонально еквівалентними. Їх значення варіюються в межах від 0 до 1. Для зеленої рослинності характерні показники в діапазоні від 0,6 до 0,9. Розробники - Crippen R.E., 1990.

- Різницевий вегетаційний індекс (Difference VI, DVI) (2.7):

$$DVI = NIR - RED \quad (2.7)$$

Індекс може набувати будь-яких значень, а ізо вегетаційні лінії розташовані паралельно одна до одної. Розробники: Lillesand T.M. і Kiefer R. W., 1987; Richardson і Everitt, 1992.

- Перпендикулярний вегетаційний індекс (Perpendicular Vegetation Index, PVI) (2.8):

$$PVI = \sin \alpha \cdot NIR - \cos \alpha \cdot RED \quad (2.8)$$

$\alpha$  – кут між ґрунтовою лінією і віссю NIR. Індекс може набувати значень від -1 до 1. Розробники - Richardson A.J. і Wiegand C.L., 1977.

- Зважений різницевий вегетаційний індекс (Weighted Difference VI, WDVI) (2.9):

$$WDVI = NIR - gRED \quad (2.9)$$

$g$  – нахил ґрунтової лінії. Пов'язаний з PVI приблизно так само, як IPVI пов'язаний з NDVI.

WDVI є спрощеною математичною версією PVI, але характеризується необмеженим діапазоном значень. Подібно до PVI, цей індекс має високу чутливість до впливу атмосферних умов. Розробники - Clevers J.G., 1988.

- Трансформований вегетаційний індекс ((Transformed Vegetation Index, TVI) (2.10):

$$TVI = \sqrt{NDVI + 0,5} \quad (2.10)$$

0,5 додається для виключення негативних значень під коренем. Функціонально TVI і NDVI еквівалентні. Розробники - Tucker C.J. і ін., 1979.

### Індекси, стійкі до впливу ґрунту

- Ґрунтовий вегетаційний індекс (Soil Adjusted VI, SAVI) (2.11):

$$SAVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED-L} (1 + L) \quad (2.11)$$

$$L = [0;1]$$

L=0 для найбільшого індексу листяного покриву; L=1 для найменшого індексу листяного покриву. Оптимальне значення L=0,5. Значення індексу змінюються від -1 до 1. Лінія ґрунту проходить через точку 0. Розробники - Huete A.R., 1988; Huete A.R., і Liu H., 1994; Qi J. та ін., 1994.

- Трансформований коригований ґрунтовий вегетаційний індекс (Transformed Soil Adjusted VI, TSAVI) (2.12):

$$TSAVI = \frac{s(NIR-s \cdot RED-a)}{a \cdot NIR+RED-a \cdot s+X(1+s^2)} (1 + L) \quad (2.12)$$

a – координата перетину ґрунтової лінії з віссю NIR.

s – нахил ґрунтової лінії.

X – коефіцієнт корекції для зменшення ґрунтового шуму.

Значення індексу змінюються від -1 до 1. Лінія ґрунту може мати різний нахил. Розробники - Baret F. і ін., 1989; Baret F. і Guyot G., 1991.

- Модифікований ґрунтовий вегетаційний індекс (Modified Soil Adjusted VI, MSAVI) (2.13, 2.14):

$$MSAVI2 = \frac{NIR-RED}{NIR+RED+L} (1 + L) \quad (2.13)$$

$$L = 1 - 2 \cdot s \cdot NDWI \cdot WDWI \quad (2.14)$$

- Модифікований ґрунтовий вегетаційний індекс-2 (Modified Soil Adjusted VI-2, MSAVI-2) (2.15, 2.16):

$$MSAVI2 = \frac{NIR-RED}{NIR+RED+L} (1 + L) \quad (2.15)$$

$$L = 1 - \frac{2 \cdot NIR + 1 - \sqrt{(2 \cdot NIR - 1)^2 - 8(NIR - RED)}}{2} \quad (2.16)$$

s - нахил ґрунтової лінії.

MSAVI-2 - це другий модифікований ґрунтовий індекс, як варіант MSAVI. Для розрахунку індексу не потрібно знаходження ґрунтової лінії і обчислення WdVI, NDVI. Значення індексу змінюються від -1 до 1. Лінія ґрунтів може мати різний нахил і проходить через точку 0. Розробники - Qi J. та ін., 1994.

### Індекси, стійкі до впливу атмосфери

- Індекс глобального моніторингу навколишнього середовища (Global Environmental Monitoring Index, GEMI) (2.17, 2.18):

$$GEMI = E - (1 - 0,25 \cdot E) - \frac{RED - 0,125}{1 - RED} \quad (2.17)$$

$$E = \frac{2(NIR^2 - RED^2) + 1,5 \cdot NIR + 0,5 \cdot RED}{NIR + RED + 0,5} \quad (2.18)$$

Індекс має значення в межах від 0 до 1. Розроблений Pinty і Verstraete, 1991. Метою було уникнення потреби в детальній атмосферній корекції шляхом створення універсальної поправки, що враховує вплив атмосфери на вегетаційний індекс.

- Вегетаційний індекс, стійкий до впливу атмосфери ((Atmospherically Resistant Vegetation Index, ARVI) (2.19, 2.20):

$$ARVI = \frac{NIR - Rb}{NIR + Rb} \quad (2.19)$$

$$Rb = a(RED - BLUE) \quad (2.20)$$

Як правило  $a=1$ , за слабого покриття рослинності і невідомого типу атмосфери  $a=0,5$ . Перший атмосферостійкий вегетаційний індекс, введений Kaufman and Tanre (1992). Він використовує значення відображення у синій зоні, щоб усунути вплив атмосфери на коефіцієнти відображення в червоній зоні. Значення індексу змінюються від -1 до 1. Лінія ґрунтів може мати різний нахил і проходить через точку 0.

- Ґрунтовий вегетаційний індекс, стійкий до впливу атмосфери (Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index, SARVI) (2.21):

$$SARVI = \frac{NIR-Rb}{NIR+Rb} (1 + L) \quad (2.21)$$

Розробники - Huete A.R., і Liu H., 1994.

- Вегетаційний індекс зеленості (Green VI, GVI) (2.22, 2.23):

Існує декілька модифікацій GVI, які базуються на використанні двох або більше ділянок відкритого ґрунту для визначення ґрунтової лінії. Потім застосовується метод ортогоналізації Грама-Шмідта (Gram-Schmidt orthogonalization) для побудови «зеленої» лінії («greenness» line), що проходить через точку з максимально щільним рослинним покривом і є перпендикулярною до ґрунтової лінії.

$$GVI = -0,29 \cdot MSS4 - 0,56 \cdot MSS5 + 0,6 \cdot MSS6 + 0,49 \cdot MSS7; \quad (2.22)$$

$$GVI = -0,2848 \cdot TM4 - 0,2435 \cdot TM2 - 0,5436 \cdot TM3 + 0,7443 \cdot TM4 + 0,0840 \cdot TM5 - 0,1800 \cdot TM7 \quad (2.23)$$

де  $MSS_n$ - яскравість в каналі n системи MSS, аналогічно для ТМ. Значення індексу змінюються від -1 до 1. Лінія ґрунтів може мати різний нахил в n-вимірному просторі. Ізовегетаційні лінії паралельні до ґрунтової лінії.

- Індекс стійкості до видимої атмосфери (VARI, Visible Atmospherically Resistant Index) (2.24)

$$VARI = \frac{(GREEN-RED)}{(GREEN+RED-BLUE)} \quad (2.24)$$

Розроблений для виділення рослинності у видимій частині спектру, при ослабленні впливу різниці освітлення і атмосферних явищ. Він ідеально підходить для RGB або кольорових зображень; використовує всі три кольорові канали.

### Індекси для оцінки вмісту вологи в рослинному покриві

Для розрахунків цих індексів використовуються значення відбиття в ближній інфрачервоній і середній інфрачервоній зонах спектра.

- Водний індекс (Water Band Index, WBI) (2.24):

$$WBI = \frac{R_{0,900}}{R_{0,970}} \quad (2.24)$$

Зелена рослинність зазвичай має значення від 0,8 до 1,2. Збільшення вмісту води в рослинах призводить до збільшення поглинання в зоні близько 970 нм відносно поглинання в зоні близько 900 нм. Цей індекс застосовується для аналізу водного стресу, визначення продуктивності, аналізу пожежонебезпеки, управління зрошуваними землями та ін. Розробники - Penuelas J. I. та ін., 1995; Champagne C. та ін., 2001.

- Нормалізований різницевий водний індекс (Normalized Difference Water Index, NDWI) (2.25):

$$NDWI = \frac{R_{0,857} - R_{1,241}}{R_{0,857} + R_{1,241}} \quad (2.25)$$

Індекс може набувати значень від -1 до 1. Для зеленої рослинності зазвичай приймає значення від -0,1 до 0,4. Розробники - Gao B.C., 1995.

- Нормалізований різницевий індекс вологості (Normalized Difference Moisture Index, NDMI) (2.26):

Нормалізований різницевий індекс вологості (NDMI) чутливий до рівня вологості в рослинності. Він використовується для відстеження посух, а також вказує рівень горючих матеріалів в пожежонебезпечних зонах.



Використовує канали NIR і SWIR для створення коефіцієнта, призначеного для приглушення освітлення і атмосферних ефектів.

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1} \quad (2.26)$$

**Індекси, що розраховуються за значеннями коефіцієнтів відбиття в вузьких спектральних діапазонах**

Ці індекси використовують для розрахунків дані про яскравість в ділянці спектра від 690 до 740 нм, тобто розглядають ділянки інфрачервоного краю (red edge).

- Нормалізований різницевий вегетаційний індекс для області ближнього інфрачервоного схилу (Red Edge Normalized Difference Vegetation Index) (2.27):

$$RENDVI = \frac{R_{0,75} - R_{0,705}}{R_{0,75} + R_{0,705}} \quad (2.27)$$

Індекс набуває значень від -1 до 1. Для зеленої рослинності зазвичай приймає значення від 0.2 до 0.9. Розробники - Gitelson A.A. і ін., 1994; Sims D.A. і ін., 2002.

- Модифікований відносний вегетаційний індекс для області ближнього інфрачервоного схилу (Modified Red Edge Simple Ratio Index) (2.28):

$$mSR = \frac{R_{0,75} - R_{0,445}}{R_{0,75} + R_{0,445}} \quad (2.28)$$

Індекс набуває значень від 0 до 30. Для зеленої рослинності зазвичай приймає значення від 2 до 8. Розробники - Datt B., 1999; Sims D.A. і ін., 2002.

Веgetаційні індекси зазвичай малоефективні для територій із розрідженим рослинним покривом, оскільки за таких умов спектральні характеристики знімка здебільшого визначаються особливостями ґрунту. Відбиття різних типів ґрунтів може суттєво відрізнятися, навіть за використання широких спектральних діапазонів для аналізу. Дослідження

показують, що ґрунтовий фон значно впливає на значення індексів: на світлому фоні індекси мають нижчі значення, а на темному — вищі. Крім того, фонові матеріали, такі як ґрунт, каміння, рослинна підстилка, суттєво варіюють у червоному та ближньому інфрачервоному діапазонах, що може істотно змінювати індекси. Для подолання цих обмежень більш дієвим підходом є застосування методу спектрального змішування.

У науковій літературі опубліковано понад 200 типів вегетаційних індексів, але лише невелика підмножина має істотну біофізичну основу, яка систематично вдосконалюється.

У таблиці 2.4 наведені основні групи індексів, які рекомендовано використовувати для виявлення пошкодженої рослинності.

*Таблиця 2.4*

**Основні групи індексів для виявлення пошкодженої рослинності**

<b>№</b>	<b>Назва групи</b>	<b>Характеристика</b>
1	Broadband Greenness	Ці індекси відображають загальну кількість рослинності та її стан. Їх основне призначення — картографування рослинного покриву, визначення площ, вкритих або не вкритих рослинністю, оцінка та моніторинг стану рослинності, а також аналіз продуктивності та врожайності.
2	Narrowband Greenness	Застосовуються для оцінки кількості та стану рослинності, подібно до індексів попередньої групи. Однак відмінністю є використання ділянки ближнього інфрачервоного спектра («red edge») для розрахунків, що дає змогу виявляти навіть незначні зміни у стані рослинності.
3	Light Use Efficiency	Враховують співвідношення між різними видами пігментів для оцінки ефективності використання світла. Вони тісно пов'язані з ефективністю засвоєння вуглецю та інтенсивністю росту. Крім того, індекси цієї групи мають сильну кореляцію з поглинанням фотосинтетично активної радіації.

4	Canopy Nitrogen	Застосовуються для визначення вмісту та концентрації азоту в рослинному покриві. Азот є складовою білків, хлорофілу та багатьох інших органічних сполук. У випадку нестачі азоту листя стає блідо-зеленим і зменшується в розмірах.
5	Dry or Senescent Carbon	Враховують вміст «сухого» вуглецю - лігніну і целюлози, які у великих кількостях містяться в сухих або відмерлих тканинах рослин. Збільшення цих показників може свідчити про процеси старіння або відмирання рослин.
6	Leaf Pigments	Враховують вміст пігментів, таких як каротиноїди та антоціаніни, які характерні для пошкодженої рослинності. Їх можна використовувати для моніторингу стану рослин і оцінки врожайності.
7	Canopy Water Content	Застосовуються для визначення вмісту вологи в рослинах, оскільки високий рівень вологи є ознакою здорової рослинності.

### 2.3. Теоретичні аспекти контрольованої класифікації

#### 2.3.1. Статистичні методи розділення класів для контрольованої класифікації

Контрольована класифікація за матеріалами дистанційного зондування - це метод класифікації даних, отриманих за допомогою дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), у якому пікселі знімка відносяться до певних тематичних класів на основі попередньо визначених характеристик. Цей підхід називається контрольованим, оскільки він використовує навчальні вибірки (сигнатури), створені за допомогою відомих еталонних даних для налаштування алгоритму розпізнавання.

Роздільність класів (сигнатур) - це метод розрахунку статистичної різниці між двома класами, величина різниці, яка показує наскільки один клас віддалений від іншого в просторі ознак. Роздільність класів може розраховуватися за такими формулами:

- Евклідова відстань;
- Дивергенція;
- Трансформована дивергенція;
- Відстань Джефріса-Матусіти.

Основна мета статистичного підходу – виключення можливості перекриття класів в просторі ознак, тобто мінімізація можливості помилки при класифікації.

Розглянемо детальніше статистичні методи роздільності класів.

### ***Евклідова відстань***

Евклідова відстань між середніми значеннями класів є зручним інструментом, коли класи мають однорідні яскравості і формують компактні області в просторі ознак. Чим більша відстань між середніми значеннями класів, тим нижча ймовірність помилки. Така оцінка, як і метод класифікації за мінімальною відстанню, у цьому випадку є ефективною ((Davis et al., 1978).

Для розрахунку евклідової відстані між середніми значеннями класів використовують формулу (2.29):

$$Ew_{ij} = \sqrt{(\mu_i - \mu_j)^2} \quad (2.29)$$

де  $\mu_{i,j}$  - середнє значення яскравості для класів  $i, j$

### ***Дивергенція***

Для розрахунку дивергенції використовують формулу, яка складається з двох доданків: перший відображає лише відмінності між відповідними коваріаційними матрицями, а другий — нормалізовану відстань між математичними сподіваннями. Значення  $D_{ij}$  дорівнюватиме нулю лише тоді, коли математичні сподівання та коваріаційні матриці будуть однаковими.

Формула для розрахунку дивергенції (2.30):

$$D_{ij} = \frac{1}{2} tr \left( (C_i - C_j)(C_i^{-1} - C_j^{-1}) \right) + \frac{1}{2} tr \left( (C_i^{-1} - C_j^{-1})(\mu_i - \mu_j)(\mu_i - \mu_j)^T \right) \quad (2.30)$$

де:

$i, j$  - дві сигнатури (класи), що порівнюються;

$C_i$  - коваріаційна матриця сигнатури  $i$  (класу  $i$ );

$\mu_i$  - середнє значення класу  $i$ ;

$tr$  - функція сліду, слід матриці;

$T$  - функція транспонування.

### **Трансформована дивергенція**

Трансформована дивергенція має верхню та нижню межу. Коли обчислені значення дорівнюють верхній межі, це свідчить про якісне розділення між класами. Якщо значення дорівнюють нулю, це вказує на відсутність розподілу між класами. Значення трансформованої дивергенції варіюються в межах від 0 до 2000.

Формула для обчислення трансформованої дивергенції (2.31, 2.32):

$$D_{ij} = \frac{1}{2} tr \left( (C_i - C_j)(C_i^{-1} - C_j^{-1}) \right) + \frac{1}{2} tr \left( (C_i^{-1} - C_j^{-1})(\mu_i - \mu_j)(\mu_i - \mu_j)^T \right) \quad (2.31)$$

$$TD_{ij} = 2000(1 - \exp(\frac{-D_{ij}}{8})) \quad (2.32)$$

де:

$i, j$  - дві сигнатури (класи), що порівнюються;

$C_i$  - коваріаційна матриця сигнатури  $i$  (класу  $i$ );

$\mu_i$  - середнє значення класу  $i$ ;

$tr$  - функція сліду, слід матриці;

$T$  - функція транспонування.

### **Відстань Джефріса-Матусіти**

Відстань Джефріса-Матусіти –це міра середньої різниці між функціями щільності для двох класів. Значення відстаней Джефріса-Матусіти знаходиться в межах між 0 і 1414.

Формула для розрахунку відстані Джефріса-Матусіти (2.33, 2.34):

$$\alpha = \frac{1}{8} (\mu_i - \mu_j)^T \left( \frac{C_i + C_j}{2} \right)^{-1} (\mu_i - \mu_j) + \frac{1}{2} \ln \left( \frac{|(C_i + C_j)/2|}{\sqrt{|C_i| * |C_j|}} \right) \quad (2.33)$$

$$JM_{ij} = \sqrt{2(1 - e^{-\alpha})} \quad (2.34)$$

де:

$i, j$  - дві сигнатури (класи), що порівнюються;

$C_i$  - коваріаційна матриця сигнатури  $i$  (класу  $i$ );

$\mu_i$  - середнє значення класу  $i$ ;

$|C_i|$  - визначник матриці  $C_i$ ;

Припущення про нормальний розподіл класів дозволяє отримати вираз без інтегралів, що залежить лише від математичних сподівань і коваріаційних матриць. Різниця полягає в компоненті із від'ємною експонентою, який надає експоненційно меншу вагу зростаючим різницям між функціями щільності класів.

Для проведення дослідження ефективності методів розділення класів використано знімок лісового масиву, що розташований у Яворівському районі Львівської області, біля Івано-Франкове. Космічний знімок отриманий знімальною системою супутника QuickBird у червні 2010 року (рис.2.6). Ця супутникова знімальна система дає зображення в п'яти спектральних діапазонах (синій, червоний, зелений, ближній інфрачервоний та панхроматичний). Розрізнявальна здатність системи QuickBird-2 – 0,61 м та 2,44 м.



*Рис. 2.6. Знімок із знімальної системи супутника QuickBird (червень, 2010 р.)*

На ділянці переважають хвойні та листяні ліси різного віку та порід, у північно-східній та східній частині знімка розташовані сільськогосподарські угіддя (городи) та населений пункт. Крім цього, знімок містить велику кількість вирубок, здійснених у різний час, а також угіддя з трав'янистою та кущовою рослинністю (рис.2.6). Все це формує істотні зміни яскравісних характеристик об'єктів (Бурштинська, Х., Денис, Ю., Мадяр, Ю., & Поліщук, Б., 2016; Babushka, A., Burshtynska, Kh., & Denys, Yu., 2017; Бурштинська, Х., Бабушка, А., Поліщук, Б., & Денис, Ю., 2017).

Класифікацію виконано з розподілом на 3, 5, 7, 9, 11, 13 та 15 класів. Для кожного отриманого зображення розраховано матриці за такими показниками, як евклідова відстань, дивергенція, трансформована дивергенція та відстань Джефріса-Матусіти (Денис, Ю, 2017).

Проаналізовано значення матриць для зображень, розподілених на 3, 5, 7, 9, 11, 13 та 15 класів. У таблицях 2.5–2.10 представлені матриці значень дивергенції, трансформованої дивергенції та відстані Джефріса-Матусіти для поділу на 7 та 9 класів. Літературні джерела вказують на ці методи як більш точні метрики.

*Таблиця 2.5*

***Матриця значень трансформованої дивергенції при поділі на 7 класів***

Signature Name	1	2	3	4	5	6	7
Class 1	0	1553.93	1995.44	2000	1999.99	2000	1999.99
Class 2	1553.93	0	1594.22	1999.94	1991.25	2000	2000
Class 3	1995.44	1594.22	0	1974.87	1651.81	1999.88	2000
Class 4	2000	1999.94	1974.87	0	1746.59	1739.48	1995.8
Class 5	1999.99	1991.25	1651.81	1746.59	0	1983.26	1999.98
Class 6	2000	2000	1999.88	1739.48	1983.26	0	1693.25
Class 7	1999.99	2000	2000	1995.8	1999.98	1693.25	0

Таблиця 2.6

**Матриця значень трансформованої дивергенції при поділі на 9 класів**

Signature Name	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Class 1	0	1639.61	1997.44	2000	2000	2000	2000	2000	1999.99
Class 2	1639.61	0	1550.03	1995.5	1999.99	2000	2000	2000	1999.99
Class 3	1997.44	1550.03	0	1580.33	1994.33	1999.98	2000	2000	1999.99
Class 4	2000	1995.5	1580.33	0	1545.55	1992.13	1999.98	2000	2000
Class 5	2000	1999.99	1994.33	<b>1545.55</b>	0	1540.02	1993.28	2000	2000
Class 6	2000	2000	1999.98	1992.13	<b>1540.02</b>	0	1557.43	1997.74	2000
Class 7	2000	2000	2000	1999.98	1993.28	1557.43	0	1586.56	2000
Class 8	2000	2000	2000	2000	2000	1997.74	1586.56	0	2000
Class 9	1999.92	1999.99	1999.99	2000	2000	2000	2000	2000	0

Таблиця 2.7

**Матриця значень дивергенції при поділі на 7 класів**

Signature Name	1	2	3	4	5	6	7
Class 1	0	12.0034	48.676	139.178	95.2013	145.039	95.5943
Class 2	48.676	0	12.7608	83.6221	43.452	120.845	144.506
Class 3	139.178	12.7608	0	35.0144	13.9851	77.9079	122.852
Class 4	139.178	83.621	35.0144	0	16.5273	16.3058	49.3277
Class 5	95.2013	43.452	13.9851	16.5273	0	38.2642	93.1424
Class 6	145.039	120.845	77.9079	16.3058	38.2642	0	14.9989
Class 7	95.5943	144.506	122.85	49.3277	93.1421	14.9989	0

Таблиця 2.8

**Матриця значень дивергенції при поділі на 9 класів**

Signature Name	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Class 1	0	13.7098	53.2943	118.886	191.397	230.415	201.452	123.791	80.7561
Class 2	13.7098	0	11.9337	48.7765	102.857	154.375	181.59	197.828	100.068
Class 3	53.2943	11.9337	0	12.4915	46.9265	93.5165	139.014	195.983	97.4479
Class 4	118.886	48.7765	12.4915	0	11.8546	44.2978	90.703	163.566	108.992
Class 5	191.397	102.857	46.9265	<b>11.8546</b>	0	11.7577	45.5644	112.27	104.669
Class 6	230.415	154.375	93.5165	44.2978	<b>11.7577</b>	0	12.0664	54.2886	104.21
Class 7	201.452	181.59	139.014	90.703	45.5644	12.0664	0	12.6112	122.222
Class 8	123.791	197.828	195.983	163.566	112.27	54.2886	12.6112	0	220.879
Class 9	80.7561	100.068	97.4479	108.992	104.669	104.21	122.222	220.879	0



Таблиця 2.9

**Матриця відстаней Джефріса-Матусіти при поділі на 7 класів**

Signature Name	1	2	3	4	5	6	7
Class 1	0	1101.08	1369.92	1413.66	1409.39	1414.19	1414.21
Class 2	1101.08	0	1250.3	1414.17	1409.58	1414.21	1414.21
Class 3	1369.92	1250.3	0	1404.66	1240.02	1414.13	1414.11
Class 4	1413.66	1414.17	1404.66	0	1253.69	1274.51	1388.81
Class 5	1409.39	1409.58	1240.02	1253.69	0	1405.9	1412.69
Class 6	1414.19	1414.21	1414.13	1274.51	1405.9	0	1212.22
Class 7	1414.21	1414.21	1414.11	1388.81	1999.98	1212.22	0

Таблиця 2.10

**Матриця відстаней Джефріса-Матусіти при поділі на 9 класів**

Signature Name	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Class 1	0	1126.33	1368.58	1409.21	1413.78	1414.19	1414.21	1414.21	1408.34
Class 2	1126.33	0	1229.45	1410.88	1414.2	1414.21	1414.21	1414.21	1398.67
Class 3	1368.58	1229.45	0	1252.36	1411.85	1414.21	1414.21	1414.21	1372.01
Class 4	1409.21	1410.88	1252.36	0	1242.73	1411.38	1414.19	1414.16	1358.32
Class 5	1413.78	1412	1411.85	1242.73	0	1238.89	1409.48	1412.7	1359.14
Class 6	1414.19	1414.21	1414.21	1411.38	1238.89	0	1227.52	1390.56	1376.79
Class 7	1414.21	1414.21	1414.21	1414.19	1409.48	1227.52	0	1161.64	1400.04
Class 8	1414.21	1414.21	1414.21	1414.16	1412.7	1390.56	1161.64	0	<b>1414.46</b>
Class 9	1408.34	1398.67	1372.01	1358.32	1359.14	1376.79	1400.04	1414.46	0

З аналізу таблиць 2.5 і 2.6, що містять значення трансформованої дивергенції, встановлено: при поділі на 9 класів є два значення, менші за 1550, що свідчить про неможливість розділення класів (класи 4 і 5, 5 і 6). Отже, для подальшого опрацювання оптимальним буде поділ на 7–8 класів.

Порівнюючи значення трансформованої дивергенції та дивергенції (таблиці 2.7, 2.8), можна зробити висновок про їхню подібність, хоча дивергенція не має встановлених меж, що ускладнює її прямий аналіз. Аналіз матриць за методом відстані Джефріса-Матусіти також складніший, оскільки немає конкретних порогових значень для роздільності класів. У результаті аналізу (таблиці 2.9, 2.10) виявлено, що при поділі на 9 класів одне значення

біля діагоналі досягає 1414,21, що свідчить про нечітке розділення (класи 8 і 9).

Загалом методи трансформованої дивергенції та дивергенції виявилися близькими за результатами роздільності класів.

### **2.3.2. Контрольована класифікація**

Процес отримання тематичної інформації за даними дистанційного зондування Землі та із застосуванням автоматизованих методів опрацювання називається тематичною класифікацією. Класифікаційні алгоритми ґрунтуються на тому, що кожен об'єкт має характерні особливості відбиття в різних ділянках електромагнітного спектра. Оскільки багатоканальні знімки фіксують ці особливості, вони використовуються для ідентифікації об'єктів.

Контрольована класифікація (англ. supervised classification) передбачає віднесення кожного пікселя на знімку до відомого класу об'єктів, який має попередньо визначений спектральний образ у багатовимірному просторі ознак. Спектральні образи визначаються за допомогою сигнатур — еталонних ділянок на знімку, які представляють певні тематичні класи. Значення пікселів у сигнатурах використовуються як навчальні вибірки для налаштування алгоритму, після чого кожен піксель знімка порівнюється з еталонами і відноситься до відповідного класу.

**Класифікація за правилом мінімальної відстані (Minimum Distance to Means, MD)** обчислює Евклідову відстань для кожного пікселя у зображенні для кожного класу (2.35):

$$D_i(x) = \sqrt{(x - m_i)^T(x - m_i)} \quad (2.35)$$

де:

$D$  - Евклідова відстань;

$i$  -  $i$ -ий клас

$x$  -  $n$ -вимірні дані ( $n$  - номер каналу);

$m_i$  - середній вектор для класу.

Алгоритм мінімальної відстані демонструє доволі високу точність класифікації, навіть за умов визначення великої кількості класів із частковим перекриттям у просторі спектральних ознак. Він працює швидше, ніж інші параметричні алгоритми, оскільки не потребує обчислення додаткових статистичних характеристик. Цей метод зручно застосовувати для класифікації континуальних властивостей, які змінюються поступово. Однак ефективність алгоритму залежить від компактного розташування значень спектральної яскравості навколо середніх спектральних показників класів. Якщо ця умова не дотримується, і область спектральних ознак класу має витягнуту форму, доцільніше використовувати більш складні алгоритми, які враховують взаємозв'язки між спектральними ділянками. (Richards, & Jia, 2006)

**Класифікація за правилом відстані Махаланобіса (Mahalanobis Distance)** обчислює відстань Махаланобіса для кожного пікселя у зображенні в кожному класі (2.36):

$$D_i(x) = \sqrt{(x - m_i)^T \Sigma_i^{-1} (x - m_i)} \quad (2.36)$$

де:

$D$  - відстань Махаланобіса;

$i$  -  $i$ -ий клас;

$x$  =  $n$ -вимірні дані ( $n$  - номер каналу);

$\Sigma_i^{-1}$  - обернена коваріаційна матриця для класу;

$m_i$  - середній вектор для класу.

Цей алгоритм в якості міри подібності між пікселями застосовує показник відстані Махаланобіса, названого на честь індійського статистика Прасанти Чандри Махаланобіса, який запропонував метрику в 1936 р.

Використання відстані Махаланобіса є більш ефективним підходом для оцінки міри близькості між спектральними характеристиками пікселів та середніми значеннями яскравості еталонів. Формула для розрахунку цієї

відстані враховує не лише середні значення, але й коефіцієнти коваріаційної матриці. Коваріаційна матриця описує ступінь статистичного зв'язку між яскравостями пікселів у різних спектральних зонах для об'єктів і-го класу. (Fukunaga,1990; Шпак, 2012)

**Класифікація за правилом максимальної вірогідності (Maximum Likelihood Classification, MLC)** обчислює наступні дискримінантні функції для кожного пікселя на зображенні (2.37):

$$g_i(x) = \ln p(\omega_i) - 1/2 \ln |\Sigma_i| - 1/2 (x - m_i)^T \Sigma_i^{-1} (x - m_i) \quad (2.37)$$

де:

$i$  - і-ий клас;

$x$  -  $n$ -вимірні дані ( $n$  - номер каналу);

$p(\omega_i)$  - вірогідність належності класифікованого пікселя до класу;

$|\Sigma_i|$  - детермінант коваріаційної матриці даних у класі;

$\Sigma_i^{-1}$  - обернена коваріаційна матриця для класу;

$m_i$  - середній вектор для класу.

Класифікація за правилом максимальної ймовірності використовує навчальні дані для оцінки середніх значень і відхилень класів, які використовуються для оцінки ймовірності, а також дозволяють розглянути мінливість значень яскравості в кожному класі. Цей класифікатор базується на основі Байєсівської теорії ймовірності. (Perumal and Bhaskaran, 2010)

При нормальному розподілі область ознак кожного класу в багатовимірному просторі має форму еліпсоїда (точніше гіпереліпса). Середнє значення яскравості цього класу в кожній з знімальних зон, тобто центр класу, визначає положення еліпса в просторі ознак. Його відносні розміри та орієнтація визначаються коваріаційною матрицею. Відповідно, за навчальною вибіркою необхідно розрахувати центр кожного з класів, елементи коваріаційної матриці, а потім – проаналізувати положення пікселів зображення. В якості критерію віднесення пікселя до певного тематичного класу застосовується відстань Махаланобіса від спектрального середнього

класу. Чим ближче значення яскравості пікселя до центру певного еліпса, тим вища імовірність належності пікселя до певного класу. Таким чином при класифікації задовольняється умова максимальної імовірності віднесення пікселя до даного класу – звідки і назва алгоритму.

Отже, при класифікації методом максимальної вірогідності області розподілу значень класів в просторі спектральних ознак моделюються як гіпереліпси, орієнтовані в напрямку найбільшої розкиданості значень та центром в точці з середніми значеннями ознак даного об'єкта. Завдяки цьому алгоритм придатний до застосування в складних випадках, коли значення яскравості різних класів вельми близькі, тобто репрезентують значну кількість різнорідних об'єктів різної площі та характеру розміщення. Цим пояснюється вимогливість алгоритму до якості навчальних вибірок, крім того, проведення розрахунків значного об'єму потребує багато комп'ютерного часу.

**Класифікація за способом спектрального кута (*Spectral Angle Mapper, SAM*)** обчислює спектральний кут в радіанах для кожного пікселя у зображенні до середнього значення спектральної яскравості у кожному класі. Чим менший кут, тим більше подібний піксель до даного класу. Переважно цей метод використовують для даних з високим спектральним розрізненням. (Kruse et al.,1993).

Формула для обчислення спектрального кута  $\theta$  між спектральними векторами пікселя  $x$  та середнього значення  $\mu_i$  класу  $i$  (2.38):

$$\theta_{(x,i)} = \cos^{-1} \left( \frac{x \cdot \mu_i}{\|x\| \|\mu_i\|} \right) \quad (2.38)$$

де:

$x \cdot \mu_i$  – скалярний добуток векторів  $x$  і  $\mu_i$

$\|x\|$  та  $\|\mu_i\|$  – довжини векторів

Цей алгоритм розглядає спектральні значення в багатовимірному просторі як вектор, що має довжину і кут, які визначені відносно осей координат у просторі спектральних ознак. Довжина вектора може

змінюватися зі зростанням чи зменшенням спектральної яскравості, тоді як кутова орієнтація, як відносна величина, залишається незмінною. Таким чином, подібність між двома точками в просторі ознак можна оцінити через спектральний кут між їхніми векторами. Недоліком цього алгоритму є те, що він не враховує довжину вектора, тобто не враховує зміни яскравості об'єктів. Проте, коли пікселі різних тематичних класів у просторі ознак розташовані на значній відстані один від одного, даний метод може забезпечити ефективне розділення класів.

#### **2.4. Висновки до розділу 2**

1) У розділі 2 сформовано структурну схему досліджень, яка складається з трьох блоків - польові дослідження, аерознімання за допомогою безпілотного літального апарата (БПЛА) та камеральні роботи. Завершальним етапом є аналіз отриманих даних.

2) Розглянуто теоретичні аспекти контрольованої класифікації, зокрема статистичні методи розділення класів. Дослідження ефективності розділення класів виконано за зображенням лісового масиву, отриманого з космічного супутника QuickBird (червень, 2010р). Важливим для проведення тематичної класифікації є вибір оптимальної кількості класів. Було проведено поділ на 3, 5, 7, 9, 11, 13 і 15 класів. Дослідження виконано для таких методів розділення класів: евклідової відстані, дивергенції трансформованої дивергенції та відстані Джефріса-Матусіти. При аналізі статистичних методів розділення класів встановлено, що найефективнішим при класифікації лісів є метод трансформованої дивергенції. Встановлено, що для даної території оптимальною кількістю класів є 7-8.

## **РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РОБОТИ З МОНІТОРИНГУ ЗАСИХАННЯ ХВОЙНИХ ЛІСІВ ПРИКАРПАТТЯ**

### **3.1. Характеристика об'єкта дослідження**

Згідно з фізико-географічним районуванням України, більша частина території Львівської та Івано-Франківської областей входить до фізико-географічної підобласті Скибових Карпат, що належить до регіону Зовнішніх Карпат (Попов, 1968). Відповідно до класифікації С.А. Генсірука та ін. (Генсірук, 1981), цей регіон визначено як Передкарпаття, що поділяється на два лісогосподарські райони: Передкарпатський та район Зовнішніх Карпат.

У Передкарпатті домінуючими видами дерев є дуб звичайний, бук лісовий і ялиця біла. Крім того, зустрічаються ясен звичайний, граб звичайний, клен-явір, клен гостролистий та липа дрібнолиста. Значну площу займають насадження за участю ялини європейської (смереки), зокрема чисті її масиви, які зростають за межами свого природного ареалу. У Зовнішніх Карпатах основними лісотвірними породами є бук лісовий, ялиця біла та ялина європейська.

На рис. 3.1 показано картосхему Українських Карпат.

Славський лісгосп заснований у 1960 році відповідно до наказу Головного управління лісового господарства та лісозаготівель при Раді Міністрів УРСР від 23 березня 1960 року. Офіс лісгоспу розташований у смт Славське, за 28 км від районного центру — міста Сколе.

На основі наказу Міністерства лісового господарства України від 31 жовтня 1991 року № 133, Славський лісгосп було перейменовано на Славський держлісгосп. Згодом, згідно з наказом № 154 від 30 травня 2005 року та розпорядженням Львівського обласного управління лісового господарства № 77 від 16 травня 2005 року, які були прийняті на підставі наказу Державного комітету лісового господарства України № 310 від 29

квітня 2005 року, держлісгосп було перейменовано у Державне підприємство «Славське лісове господарство» (Тухлянське лісництво, 2013).



**Рис. 3.1.** Картохема Українських Карпат

ДП «Славське лісове господарство» розташоване у південно-західній частині Львівської області, в межах Сколівського адміністративного району. Адреса підприємства: 82660, Львівська область, Сколівський район, смт. Славське, вул. О. Степанівни, 7.

ДП «Славське лісове господарство» складається з 6 лісництв: Головецьке, Климецьке, Опорецьке, Рожанське, Сможанське та Тухлянське.



У табл. 3.1 наведено дані про адміністративно-організаційну структуру Державного підприємства «Славське лісове господарство».

Таблиця 3.1

**Адміністративно-організаційна структура ДП «Славське лісове господарство»**

Назва лісництва	Місцезнаходження контори	Площа, га
Головецьке	с. Головецько	2925,0
Климецьке	с. Климець	4435,0
Опорецьке	с. Опорець	4533,0
Рожанське	с. Н. Рожанка	4724,0
Сможанське	с. Сможе	3148,0
Тухлянське	с. Тухля	4887,0
Σ		24652,0

Загальна площа Державного підприємства «Славське лісове господарство» становить 24 652 га.

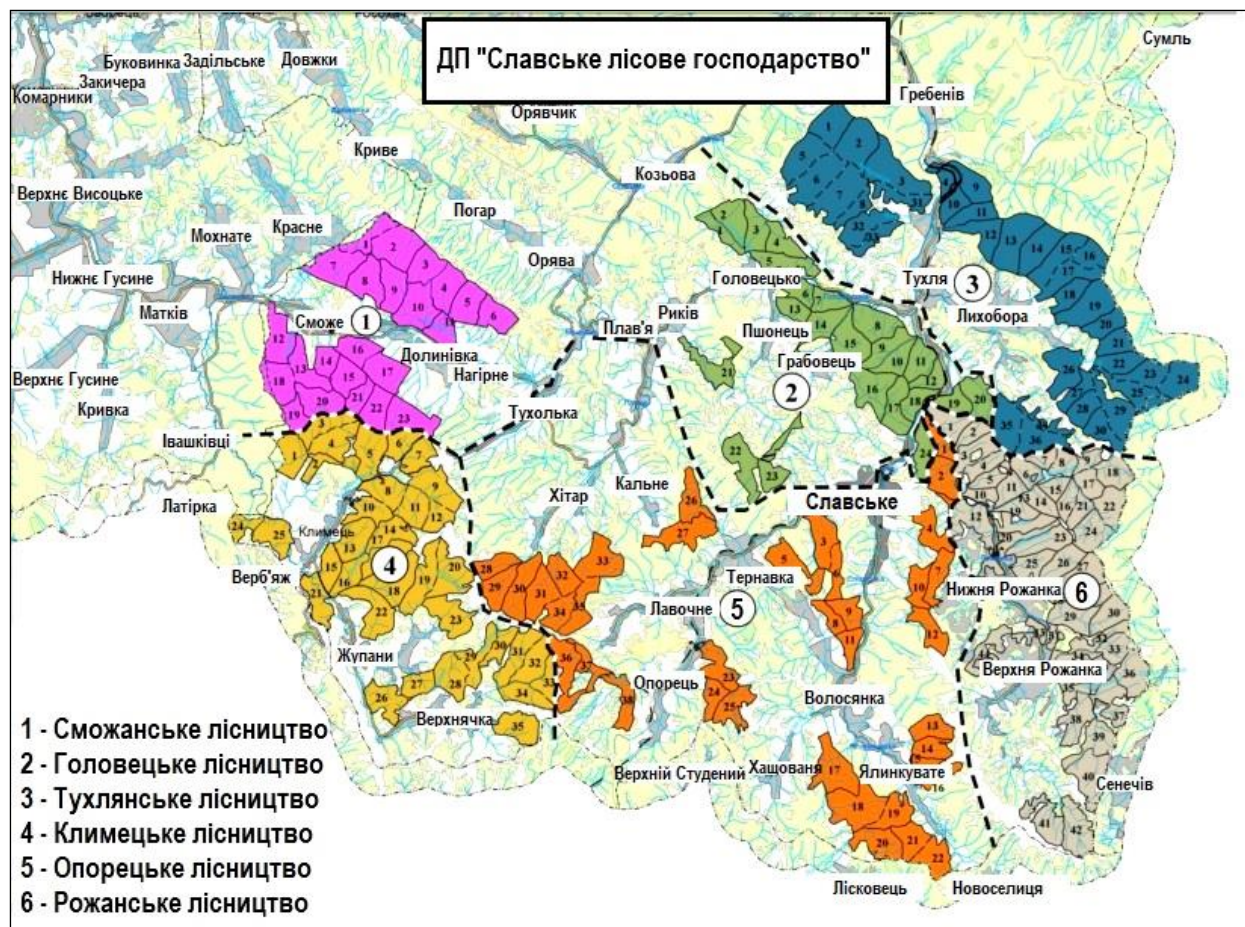
На рис. 3.2 подано картосхему ДП «Славське лісове господарство».

З аналізу наявних даних відомо, що перші лісовпорядні роботи на території Славського лісового господарства проводились у 1932-1935 роках.

Перше лісовпорядкування лісів, після другої світової війни, було проведене в 1951-1952 рр. Львівською експедицією, а лісів колишніх колгоспів – в 1955-1956 рр. Закарпатською експедицією.

Наступні лісовпорядні роботи проводились в 1959-1964 рр. Українською лісовпорядною експедицією, 1970 році – 4-ою Київською експедицією, в 1980 році – Комплексною експедицією Українського лісовпорядного підприємства ВО «Ліспроєкт», в 1991-1992 рр. - Львівською державною лісовпорядною експедицією ВО «Укрдержліспроєкт», в 2007-2008 рр. – Львівською експедицією.

Останні роботи виконані згідно з вимогами лісовпорядної інструкції 1986 року за I розрядом.



*Рис. 3.2. Картосхема ДП «Славське лісове господарство»*

Тухлянське лісництво знаходиться в північно-східній частині Сколівського району Львівської області, у мальовничій гірській місцевості, що входить до складу Сколівських Бескид. Лісництво має важливе екологічне та економічне значення, сприяючи збереженню біорізноманіття та забезпечуючи регіон лісовою продукцією. (Тухлянське лісництво, 2013)

Його загальна площа становить 4 888 га. Адміністративна контора лісництва знаходиться у селі Тухля, яке розташоване на відстані 5 км від контори Славського лісового господарства та 19 км від районного центру. Територія лісництва поділена на п'ять майстерських ділянок.

Лісництво входить до складу Центрально-Європейської провінції Європейської зони, яка належить до зони широколистяних лісів Східно-

Карпатської гірської підпровінції смереково-ялицево-букових і смерекових лісів фізико-географічного району Сколівських Бескид.

Клімат у цій місцевості перехідний — від помірно теплого західноєвропейського до континентального східноєвропейського. Тривалість вегетаційного періоду становить 146 днів.

За характером рельєфу ліси на території лісництва належать до гірських. Ґрунти переважно бурі гірсько-лісові, середньо-потужні щербенисті суглинисті (Тухлянське лісництво, 2013).

На території Тухлянського лісництва розташовані такі об'єкти природно-заповідного фонду: пралісова пам'ятка природи місцевого значення «Тухлянська», Заповідне лісове урочище «Кобилець», заповідне лісове урочище «Магура», заказник «Кремінь» та заказник «Димківці».

Основні відомості про ці об'єкти наведені у табл. 3.2.

*Таблиця 3.2*

***Відомості про об'єкти природно-заповідного фонду***

Назва	Площа	Розташування	Тип	Коротка характеристика
Пралісова пам'ятка природи місцевого значення «Тухлянська» (рішення Львівської обласної ради від 12.03.2019 № 816)	21,7	Тухлянське лісництво, кв.35 (45, 46)	Ботанічний	Збереження унікальних залишків корінного природного старовікового лісу
Заповідне лісове урочище «Кобилець» (рішення Львівської обласної ради від 28.05.2019 р. №861)	58,8	Тухлянське лісництво, кв.1 (4, 7, 9-12, 14-18)	Ботанічний	Високопродуктивні ялиново-ялицево-буково-ві насадження на круто-схилах

Заповідне лісове урочище «Магура», (рішення Львівської обласної ради від 28.05.2019 р. №861)	267,0	Тухлянське лісництво, кв. 23; 24	Ландшафтний	Високопродуктивні ялиново-ялицево-букові насадження на крутосхилах
Заказник «Кремінь», (рішення Львівської обласної ради від 28.05.2019 р. №861)	265,2	Тухлянське лісництво, кв. 1 (1-3, 5, 6, 8, 13, 18-37); кв.5	Ландшафтний	Високопродуктивні ялиново-ялицево-букові насадження на круто-схилах
Заказник «Димківці», (рішення Львівської обласної ради від 28.05.2019 р. №861)	9,4	Тухлянське лісництво, кв. 28 (вид. 1-4, 12)	Ландшафтний	Цінне високопродуктивне насадження ялини штучного походження. Створене для збереження з лісівничою і природоохоронною метою

Фахівці ДП «Славське лісове господарство» та ДСЛП «Львівлісозахист» проводять рекогносцирувальні та детальні обстеження всихаючих смерекових лісостанів на території лісгоспу. На початок 2012 року загальна площа осередків шкідників і хвороб лісу становила 6171 га, з яких 524 га пошкоджено стовбуровими шкідниками, а 5647 га — хворобами; з них 4031 га потребують лісівничих заходів боротьби.

Обстеження показало, що засихання смереки стало масовим, охоплюючи як окремі куртини, так і суцільні ділянки протягом 2–4 місяців, а подекуди - всього за 2–3 тижні. Втрачаються як високоповнотні, так і низькоповнотні насадження.

Останнє лісовпорядкування було проведено 2007 року у відповідності з вимогами чинної Інструкції з впорядкування лісового фонду України. Відповідно створено ортофотоплан, який ми використовуємо як завіркову інформацію для проведення дослідження.

### **3.2. Польові дослідження стану лісів Прикарпатського регіону**

Для польових досліджень, дані з яких будуть використані як завіркова інформація, вибрано п'ять ділянок на території Тухлянського лісництва з відомими координатами, на яких виявлено засихання хвойних лісів та організовано дві експедиції для уточнення інформації: восени 2017 р. та весною 2018 р. (Денис, Паштетник & Поліщук, 2017; Денис, Ю., Паштетник, О., & Поліщук, Б., 2018).

Ділянки, на яких проводилось обстеження, представлені на рис. 3.3. Для кожної з ділянок зібрано такі дані: загальна характеристика полігону, види дерев, частота виду (%), середня висота дерева (м), середня товщина стовбура (м), середня відстань між деревами (м) та ступінь засихання (%). Інформацію про середній вік хвойних дерев та про вид посадки отримали від лісників Тухлянського лісництва.

Отримані дані для кожної з ділянок наведено у таблиці 3.3.



*Рис.3.3. Ділянки, на яких проводились дослідження*

**Результати польових досліджень**

	1 ділянка	2 ділянка	3 ділянка	4 ділянка	5 ділянка
Площа обстежуваної ділянки	3,2 га	2 га	15,2 га	12,4 га	10 га
Загальна характеристика полігону	Мішаний ліс, зрілий	Зрілий ліс	Мішаний ліс, зрілий	Зрілий ліс	Зрілий ліс
Посадка	Штучна	Штучна	Штучна	Природна	Штучна
Види дерев	Смерека, бук	Смерека, ялиця	Смерека, бук, береза	Смерека, ялиця, бук, явір	Смерека, бук
Чистота виду	9 –5	70–30	80–10 –10	70–10–10–10	90–10
Частота виду що переважає	Хвойні-95%	Хвойні-100%	Хвойні-80%	Хвойні-80%	Хвойні-90%
Середня висота дерев	15 м	20 м	20 м	25 м	30 м
Середня товщина стовбура	0,3 м	0,25 м	0,3 м	0,3 м	0,4 м
Середня відстань між деревами	2 м	1 м	2 м	1,5 м	2 м
Середній вік хвойних дерев	55 р.	46 р.	60 р.	105 р.	75 р.
Ступінь засихання	10 %	30 %	20 %	50 %	60 %

В результаті обстеження на ділянках виявлено різний ступінь засихання смереки, від 10 до 60%. Багато дерев ослаблені, що призводить до виламування їх вітрами, що ускладнювало прохідність досліджуваних ділянок (рис. 3.4). На багатьох з пошкоджених дерев виявлено ознаки шкідників (рис. 3.5).



*Рис.3.4. Повалені хвойні дерева на ділянках*



*Рис. 3.5. Дерева пошкоджені шкідниками*

На рис. 3.6 – 3.10 показані фото з ділянок, зроблені під час експедицій.



*Рис. 3.6. Фото з першої ділянки*

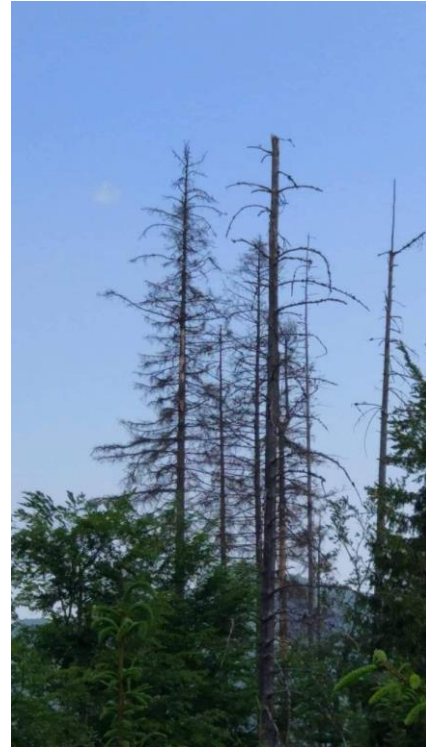


*Рис. 3.7. Фото з другої ділянки*



*Рис. 3.8. Фото з третьої ділянки*





*Рис. 3.9. Фото з четвертої ділянки*



*Рис. 3.10. Фото з п'ятої ділянки*

### **3.3. Знімання з БПЛА для вибору тестових ділянок**

Під час останньої експедиції проведено знімання з безпілотного літального апарату двох ділянок, які розташовані на різних висотах. Для

знімання використано БПЛА Trimble UX5 HP (рис. 3.11) із встановленою камерою Sony 7R. Фокусна відстань камери – 35 мм.



**Рис. 3.11.** Загальний вигляд БПЛА Trimble UX5 HP

Основні технічні характеристики БПЛА Trimble UX5 HP наведено у таблиці 3.4 (Trimble UX5/UX5 HP., б. д.).

*Таблиця 3.4*

**Основні технічні характеристики БПЛА Trimble UX5 HP**

Розмах крил	100 см
Вага	2,9 кг
Двигун	1400 Вт
Позиціонування	L1/L2 GNSS
Діапазон висот польоту	75-750 м
Крейсерська швидкість польоту	85 км/год
Максимальний час польоту	50 хв.
Дальність дистанційного керування	До 5 км
Діапазон робочих температур	від – 5°C до +35°C
Погодні умови	Вітер до 55 км/год, мряка

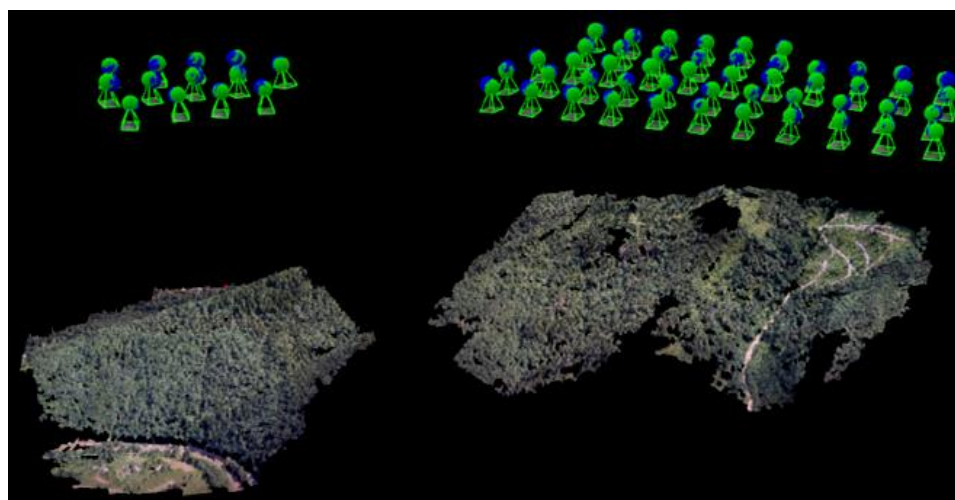
Висота знімання для першої ділянки становила 645 м, для другої – 432 м. Враховуючи параметри знімання та характеристики цифрової камери, розраховано розрізнення для контрастних об’єктів для двох ділянок. Для

першої ділянки розрізнення становить 9 см, для другої – 6 см. Така точність визначення планових координат поворотних точок ділянок з пошкодженою рослинністю дозволяє зробити висновок про можливість визначення площ тестових ділянок з високою точністю (Burshtynska, Kh., Petryk, Yu., Polishchuk, B., & Shylo Ye., 2019; Burshtynska, K., Denys, Yu., & Polishchuk, B., 2019).

Спроектовану траєкторією польоту показано на рис. 3.12 На рис. 3.13 показано хмару точок, за якою створювався ортофотоплан та центри знімків.



*Рис. 3.12. Спроекована траєкторія польоту*



*Рис. 3.13. Хмара точок та центри знімків для тестових ділянок*

За результатами знімання створено ортомозаїку, фрагмент якого наведений на рис. 3.14. Отримані дані використовуються як завіркова інформація для подальших досліджень.



*Рис. 3.14. Фрагмент ортомозаїки*

На ортозображенні можемо розрізнити здорову, пошкоджену та суху рослинність (рис. 3.15).



*Рис. 3.15. Хвойна рослинність на ортозображенні:*

*1 – здорова; 2 – пошкоджена; 3 – суха*

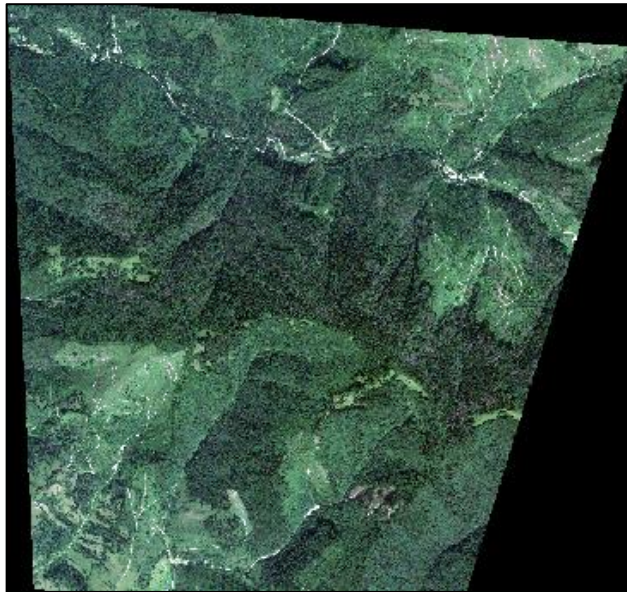
### **3.4. Використання вегетаційних індексів для виявлення пошкодженої рослинності**

Згідно з аналізом літератури (Сидельник та ін., 2018; Зацерковний та ін., 2017; Кохан, Востоков, 2009) та з урахуванням спектральних характеристик різних типів хвойної рослинності, обрано вегетаційні індекси, які доцільно використовувати для виявлення пошкоджених лісових масивів (табл. 3.5).

## Вегетаційні індекси для виявлення сухої рослинності

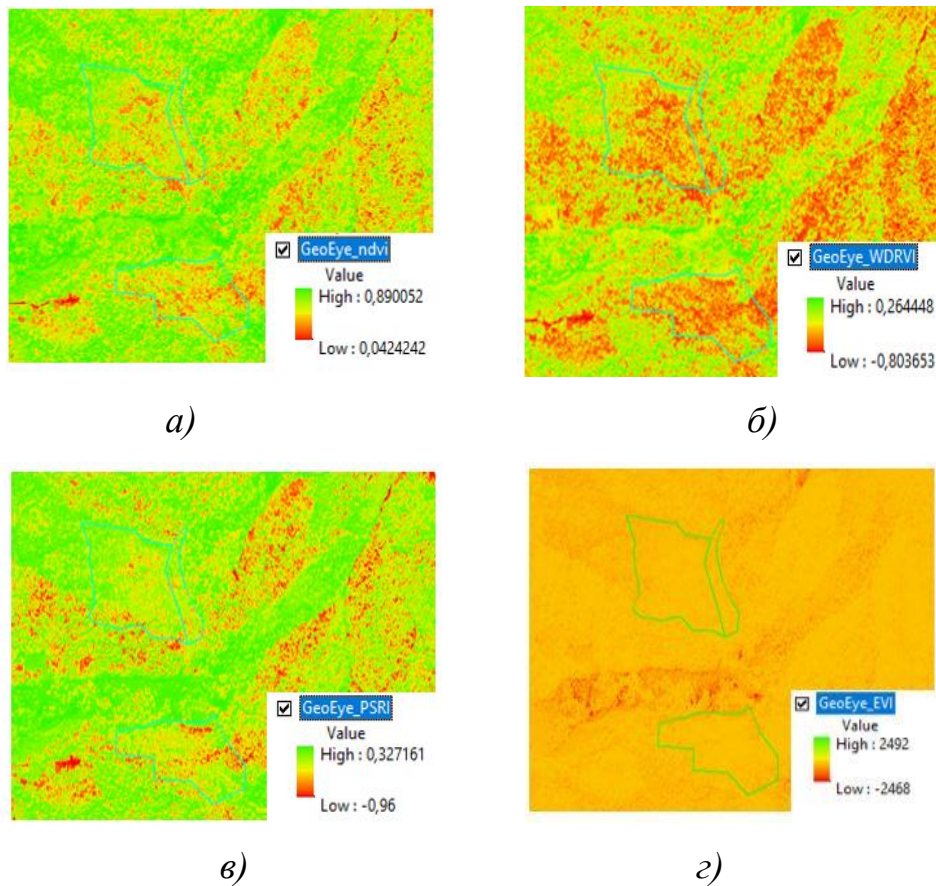
Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{B_{NIR} - B_{RED}}{B_{NIR} + B_{RED}}$	Використовується для моніторингу загальної кількості рослинності. Чутливість до фонового відбиття дещо ускладнює використання цього індексу для визначення породного складу лісового покриву.
Enhanced Vegetation Index	$EVI = \frac{B_{NIR} - B_{RED}}{B_{NIR} + 6 \cdot B_{RED} - 7,5 \cdot B_{BLUE} + 1}$	Дозволяє виділяти більше градацій лісового покриву в порівнянні з NDVI, що дає переваги для моніторингу лісів. Вплив підстильної поверхні і атмосфери мінімізовано.
Wide Dynamic Range Vegetation Index	$WDRVI = \frac{0,1 \cdot B_{NIR} - B_{RED}}{0,1 \cdot B_{NIR} + B_{RED}}$	Модифікація індексу NDVI. Використовується для підвищення точності при аналізі рослинності.
Normalized Difference Water Index	$NDWI = \frac{B_{NIR} - B_{SWIR}}{B_{NIR} + B_{SWIR}}$	При пошкодженнях лісової рослинності найчастіше відбувається їх повна загибель, рослинність різко втрачає вологу і в'яне, тому використовують спектральний індекс, що враховує вологість рослин – водний індекс.
Plant Senescence Reflectance Index	$PSRI = \frac{B_{RED} - B_{GREEN}}{B_{NIR}}$	У сухих та пошкоджених насадженнях збільшується кількість огрубілого вуглецю, яке може бути враховано індексом PSRI: Використовується для загальної оцінки сухої та мертвої рослинності.
Dry Matter Content Index	$DMCI = \frac{B_{SWIR3} - B_{SWIR2}}{B_{SWIR3} + B_{SWIR2}}$	При наявності пошкодженої лісової рослинності відбувається порушення водного балансу і утворення сухих ділянок. Індекс сухості використовується для визначення стресового стану рослинності.

Для дослідження використовуємо знімок на територію Тухлянського лісництва, отриманий знімальною системою супутника GeoEye у серпні 2011 р. (рис. 3.16). Знімальна система супутника GeoEye дозволяє отримати зображення в п'яти спектральних діапазонах (панхроматичний, синій, червоний, зелений та ближній інфрачервоний). Розрізнявальна здатність системи GeoEye – 0,41 м для панхроматичного каналу та 1,65 м для мультиспектральних каналів.



*Рис. 3.16. Знімок, отриманий знімальною системою супутника GeoEye (серпень 2011)*

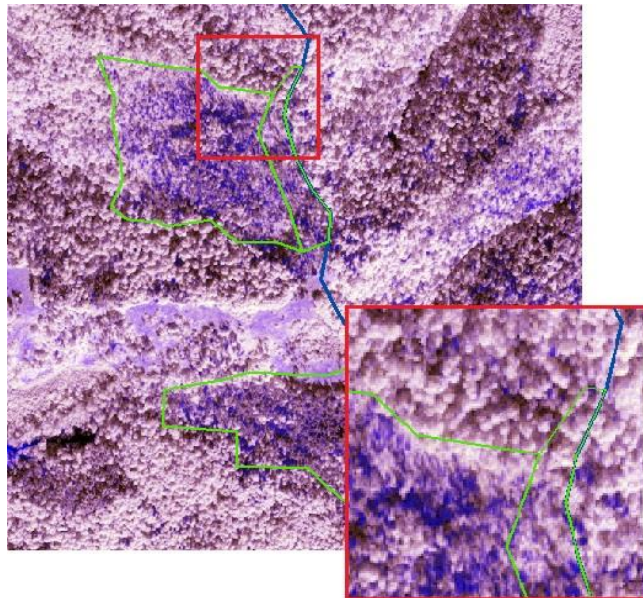
Для розрахунку вегетаційних індексів використовуємо програмне середовище ArcGIS. Індексні зображення, отримані за знімком із супутника GeoEye, а саме NDVI (а), WDRVI (б), PSRI (в) та EVI (г) наведено на рис. 3.17. Використання двох інших індексів, а саме NDWI та DMCI передбачає використання середнього інфрачервоного діапазону. Їх можна використовувати для опрацювання знімків із супутників, знімальні системи яких дають спектральну інформацію у цьому діапазоні.



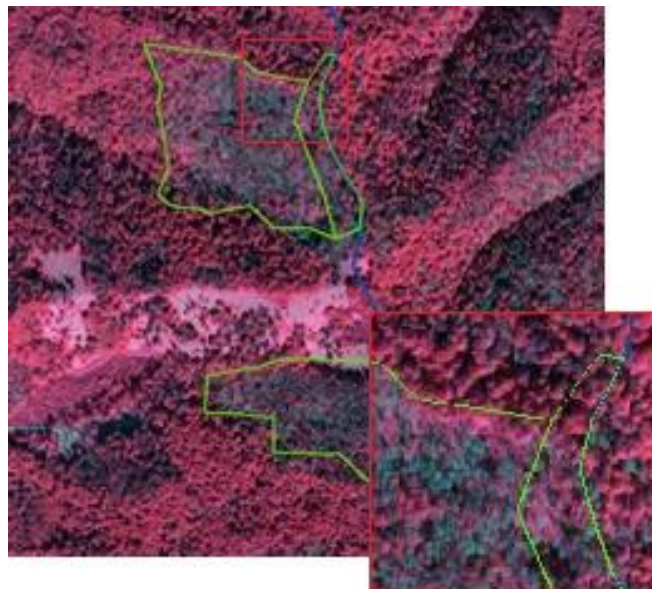
**Рис. 3.17.** Отримані зображення за вегетаційними індексами:

*a) NDVI; б) WDRVI; в) PSRI; г) EVI*

Для підвищення інтерпретаційних можливостей індексних зображень, створюємо синтезоване зображення за трьома вегетаційними індексами – NDVI, WDRVI та PSRI (рис. 3.18). Аналіз отриманого зображення дозволяє зробити висновок про чітку ідентифікацію сухої рослинності (синій колір), а також чітко розрізняється здорова хвойна та листяна рослинність. Для порівняння на рис. 3.19 наведено синтезоване зображення із каналів NIR, RED та GREEN, що найчастіше використовують для аналізу стану рослинності різних видів.



*Рис. 3.18. Композитне зображення із BI NDVI, WDRVI і PSRI*

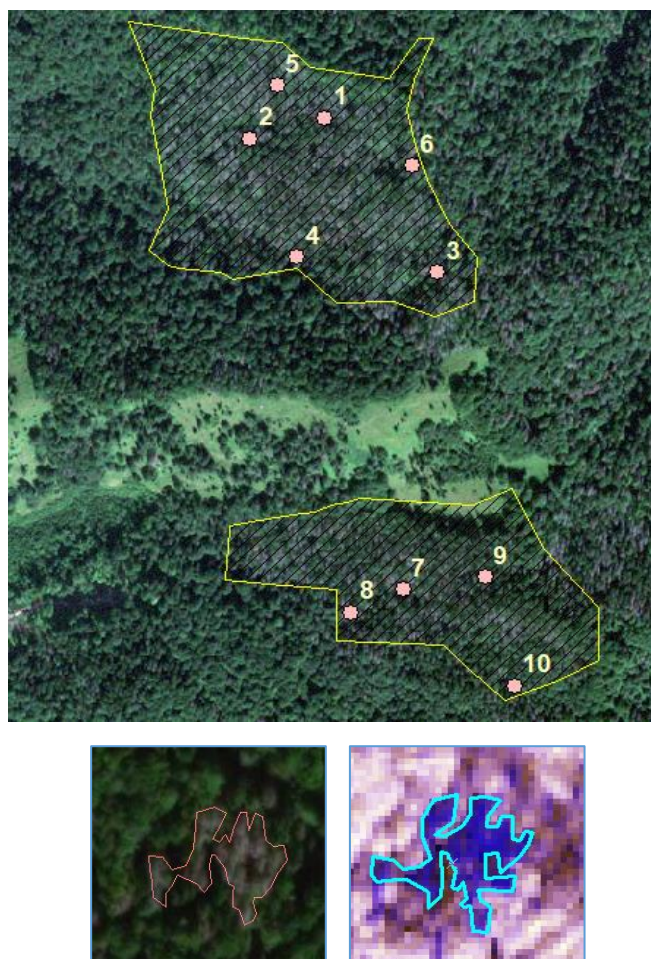


*Рис. 3.19. Синтезоване зображення із каналів NIR, RED і GREEN*

Для визначення площ ділянок із пошкодженою хвойною рослинністю виконано контрольовану класифікації за методом максимальної вірогідності для синтезованого та композиційного індексного зображення.

Для проведення оцінки точності процедури контрольованої класифікації вибрано 10 осередків засихання на двох тестових ділянках та визначено їх площі на ортофотоплані (рис. 3.20).





*Рис. 3.20. Тестові ділянки для оцінки точності*

Також визначено площі цих 10 тестових ділянок за синтезованим зображенням та за композиційним індексним зображенням. Результати подано у таблиці 3.5 (Burshtynska, Kh., Petryk, Yu., Polishchuk, B., & Shylo, Ye., 2019).

*Таблиця 3.5*

**Оцінка точності отриманих результатів**

№	Test	GeoEye (NDVI- WDRVI- PSRI)	GeoEye (NIR- RED- GREEN)	Test – GeoEye (NDVI-WDRVI- PSRI)		Test – GeoEye (NIR-RED-GREEN)	
		Площа, м <sup>2</sup>	Площа, м <sup>2</sup>	Площа, м <sup>2</sup>	Різниця, м <sup>2</sup>	Точність, %	Різниця, м <sup>2</sup>
1	1510	1428	1784	82	95	274	82
2	813	724	952	89	90	139	83

<b>3</b>	380	392	360	12	97	20	94
<b>4</b>	450	444	468	6	98	18	96
<b>5</b>	130	112	164	18	87	34	76
<b>6</b>	142	136	168	6	96	26	82
<b>7</b>	1000	980	1024	20	98	24	98
<b>8</b>	602	584	644	18	97	42	93
<b>9</b>	135	128	144	7	95	9	93
<b>10</b>	95	92	112	3	97	17	83

Аналіз результатів визначення площ на основі композиційного зображення з використанням вегетаційних індексів NDVI, WDRVI, PSRI показує високу достовірність (87–98%). Аналіз синтезованого зображення демонструє достовірність у межах 76–96%. На ідентифікацію меж ділянок із засиханням за синтезованим зображенням значно впливають підстильна поверхня та спектральна яскравість сусідніх лісових об'єктів.

### **3.5. Контрольована класифікація**

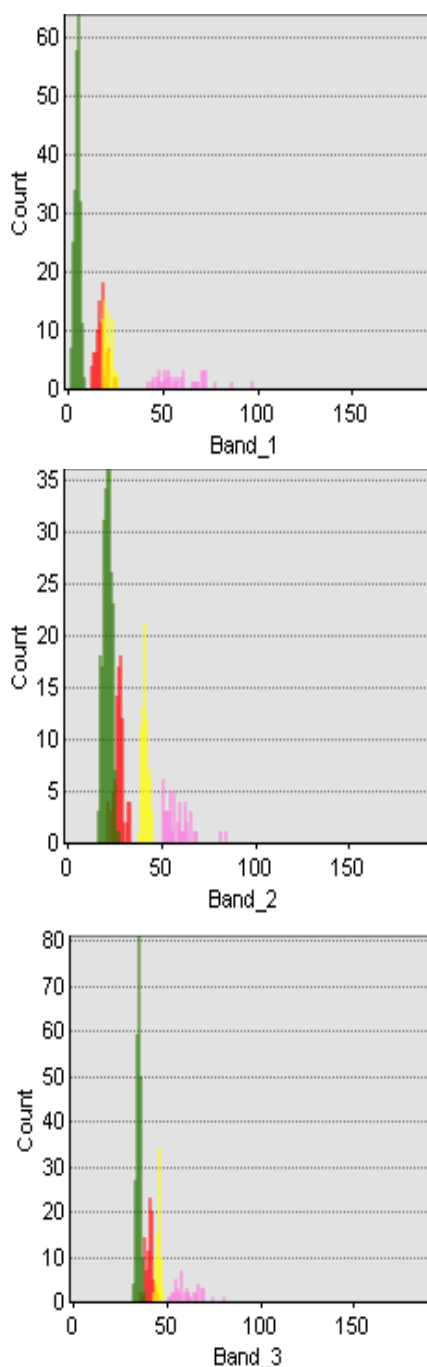
#### ***3.5.1. Моніторинг стану лісів за різночасовими космічними знімками***

Процес класифікації зображень – це процес групування пікселів зображення у певні класи, що представлятимуть один і той самий об'єкт на місцевості. Розрізняють два типи класифікації: контрольовану та неконтрольовану.

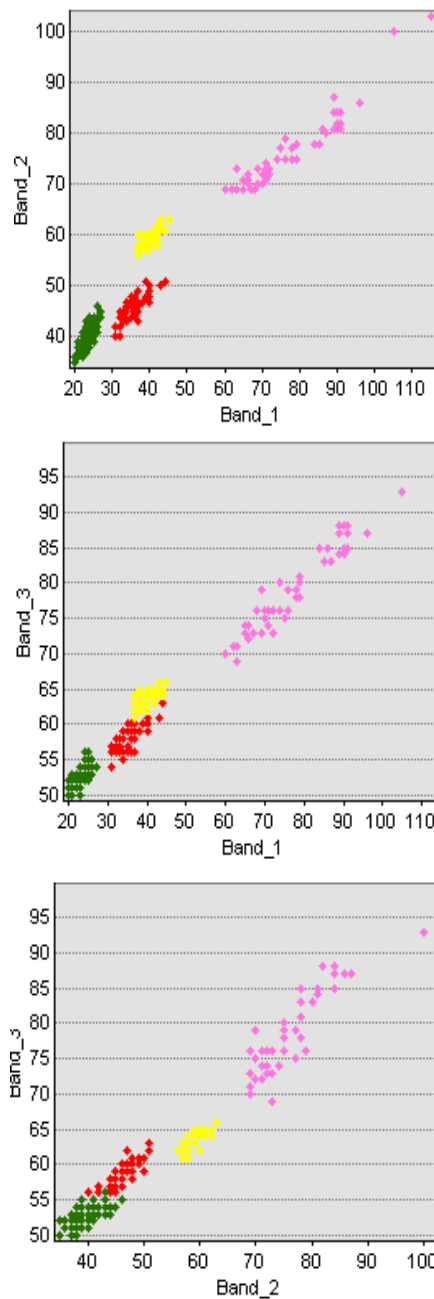
На підставі опрацьованої літератури (Лялько & Попов, 2006; Миклуш, Гаврилюк & Часковський, 2012; Burshtynska, Polishchuk & Madyar, 2014) встановлено, що для проведення контрольованої класифікації лісових масивів доцільно використовувати спосіб максимальної вірогідності.

Для проведення моніторингу використано космічні знімки літнього періоду (серпень) із знімальних систем Landsat 5 (2007 рік) та Sentinel 2 (2017 і 2018 роки), отримані з сайту Геологічної служби США (USGS).

На основі польових досліджень створено навчальні вибірки, які представляють такі класи: площі з засиханням хвойних дерев, лісові масиви, галявини та стежки. В клас галявини входять також вирубки. Для оцінки навчальних вибірок використано гістограми та діаграми розсіювання. Встановлено, що класи не перетинаються у просторі ознак. На рис. 3.21 та 3.22 подано зображення гістограм та діаграм розсіювання, які отримано для навчальних вибірок на знімку 2018 р. (Денис, Ю., Паштетник, О., & Поліщук, Б., 2018; Денис, Ю., Бурштинська, Х., & Паштетник, О., 2019).

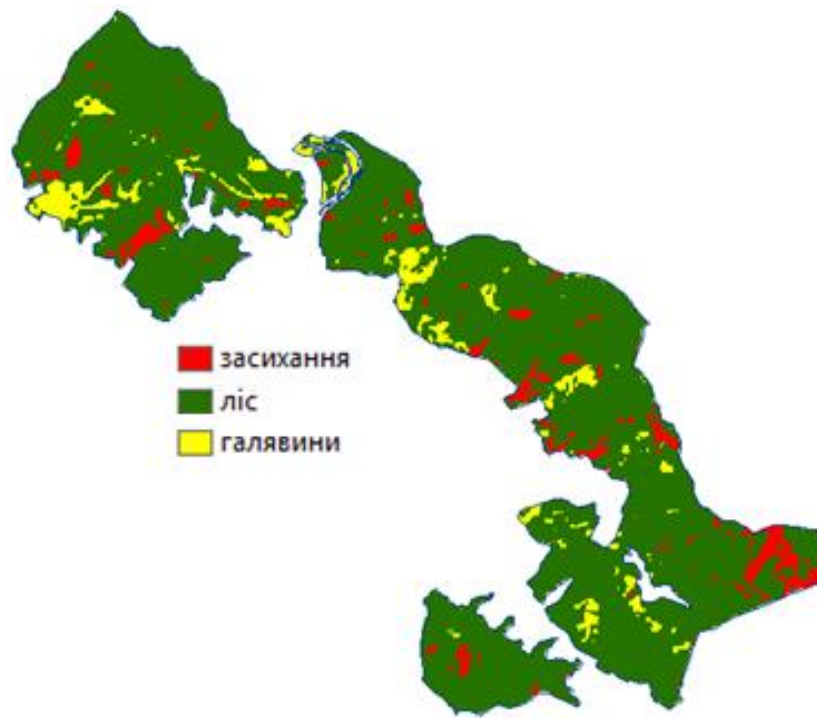


*Рис. 3.21. Гістограми для створених навчальних вибірок*

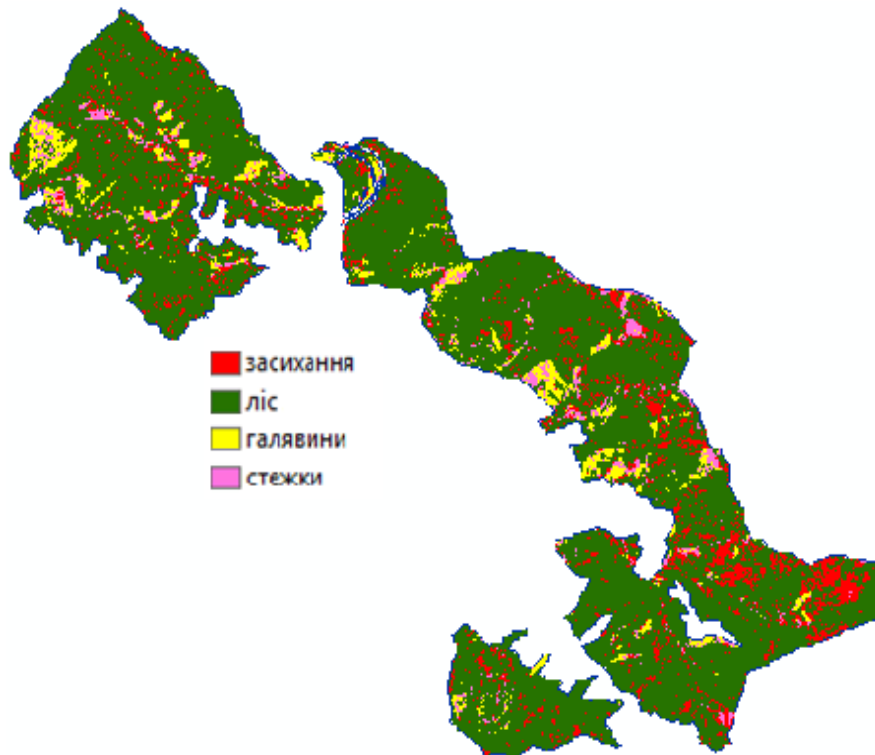


*Рис. 3.22. Діаграми розсіювання для створених навчальних вибірок*

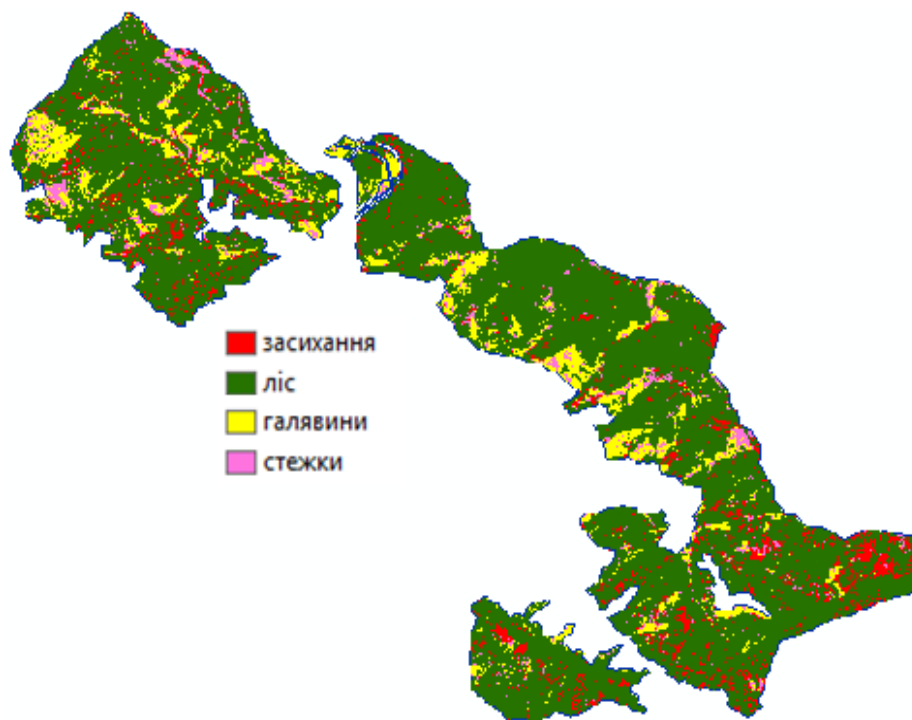
Виконуємо контрольовану класифікацію для трьох знімків за створеними навчальними вибірками відповідно. Для процесу згладжування для відкласифікованих зображень застосовано фільтр Majority Filter. Результати класифікації знімків за 2007, 2017 та 2018 роки представлені на рис. 3.23, 3.24 та 3.25 відповідно.



*Рис. 3.23. Результат класифікації за 2007 рік*



*Рис. 3.24. Результат класифікації за 2017 рік*



**Рис. 3.25. Результат класифікації за 2018 рік**

В результаті виконання контрольованої класифікації отримано площі кожного класу за 2007, 2017 та 2018 роки (табл. 3.6).

*Таблиця 3.6*

**Визначені площі класів**

Класи	Площа, га		
	2007	2017	2018
засихання	283,7	507,21	486,9
ліс	4252,0	3907,1	3859,7
стежки	-	186,2	201,8
галявини	326,0	262,6	314,8

У таблицях 3.7 та 3.8 наведені різниці площ класів за період 2007-2017 рр. та 2017-2018 рр. відповідно.

*Таблиця 3.7*

**Різниця площ класів за період 2007 – 2017 рр.**

Класи	Площа, га		
	2007	2017	різниця
засихання	283,7	507,2	223,5
ліс	4252,0	3907,1	-344,9
галявини	326,0	448,9	122,9

**Різниця площ класів за період 2017 – 2018 рр.**

Класи	Площа, га		
	2017	2018	різниця
засихання	507,2	486,9	-20,3
ліс	3907,1	3859,7	-47,4
стежки	186,2	201,8	15,6
галявини	262,63	314,8	52,2

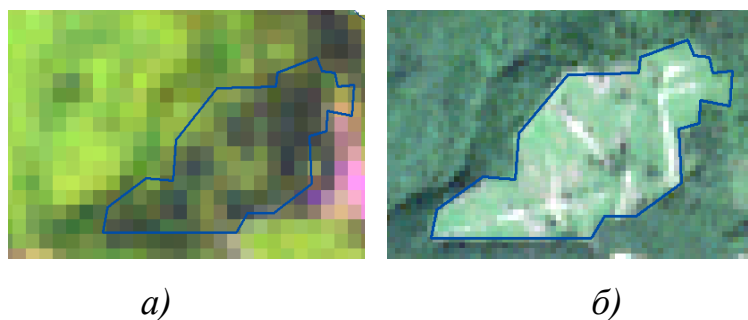
Проаналізувавши отримані дані, можна зробити висновок, що пік засихання лісів припав на 2017 рік. У період з 2007 по 2017 роки лісництво втратило 344,9 га здорового лісу, з яких 223,5 га висохли, а 122,9 га були вирубані. При порівнянні 2017 і 2018 років спостерігається додаткова втрата лісових площ на 47,4 га, при цьому площа засихання зменшилася на 20,3 га, що пояснюється падінням сухостою та його вирубкою. Це призвело до збільшення площ галявин і стежок на 52,2 та 15,6 га відповідно.

Також, за результатами класифікації знімка 2007 року було виявлено додаткові ділянки з ознаками засихання дерев (рис. 3.26), які не були позначені на ортофотоплані лісництва.



**Рис. 3.26.** Додатково ідентифіковані ділянки з засиханням хвойним дерев (на 2007 рік)

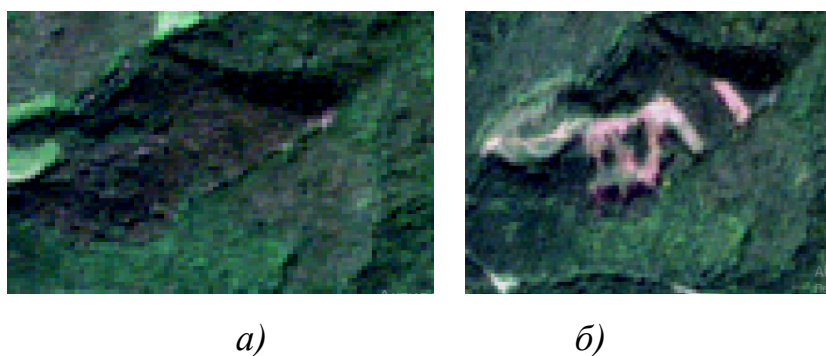
Досліджено вирубки за період 2007-2017 рр. здорового лісу та сухостою. Для цього оцифровано ділянки вирубок здорового лісу на синтезованому знімку (рис. 3.27). Результати показали, що вирубано 55,5 га функціонального лісу. Також вирубки проводилися на ділянках, де зауважено сухостій (67,8 га) (Денис, Ю., Бурштинська, Х., & Поліщук, Б., 2019; Денис, Ю., Бурштинська, Х., & Паштетник, О., 2019)



**Рис. 3.27.** Приклад вирубки лісу:

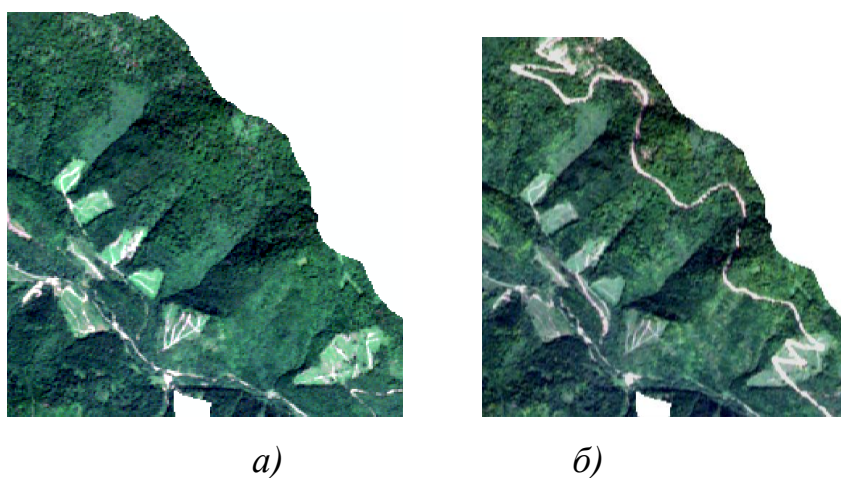
*a) 2007 р., б) 2017 р.*

Проведено моніторинг змін у стані лісових масивів за період 2017-2018 років. Виявлено, що вирубки здійснювалися з метою очищення території та зменшення кількості сухостійних дерев (рис. 3.28). Площа санітарних вирубок склала 35,3 га. Для забезпечення доступу до ділянок із засиханням хвойних дерев було прокладено лісову дорогу (рис. 3.29).



**Рис. 3.28.** Приклад вирубки пошкодженого хвойного лісу:

*a) 2017 р., б) 2018 р.*



**Рис. 3.29.** Приклад прокладення дороги до ділянок з сухостоєм:

*a) 2017 р., б) 2018 р.*



Оцінку точності проведення контрольованої класифікації виконуємо за формулами (3.1, 3.2) (Волосецький, 2012):

$$m_s = m_t \sqrt{S} \sqrt{\frac{1+k^2}{2k}} \quad (3.1)$$

$$m_t = m_x \sqrt{2} \quad (3.2)$$

де

$m_t$  - СКП визначення відстаней;

$k$  - кількість поворотних точок;

$m_x$  - розрізнення знімка.

СКП визначення площі для Landsat 5 ( $m_x = 30$  м) становить 16%, для Sentinel 2 ( $m_x = 10$  м) – 5,4%.

### ***3.5.2. Дослідження стану хвойних масивів за матеріалами космічних знімків із сузір'я супутників PlanetScope***

Супутники PlanetScope належать компанії Planet. Взагалі компанія Planet управляє трьома групами супутників – PlanetScope, RapidEye та SkySat. Завдяки унікальному поєднанню покриття, частоти та роздільної здатності дані з цих супутників забезпечують безпрецедентний набір даних для спостереження Землі. (Бурштинська, Х., & Петрик, Ю., 2023).

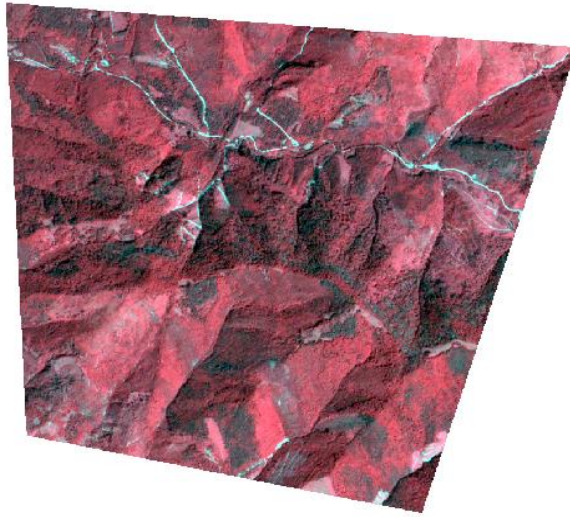
Сузір'я супутників PlanetScope складається із трьох груп наносупутників – Dove-C, Dove-R та SuperDove. Такі супутники ще називають CubeSat. Стандартизований розмір CubeSat - 10x10x10 см, що дорівнює 1U. Розмір супутників Dove із стандартними компонентами, такими як оптична камера, сонячна панель і антена зв'язку – 10x10x30 см, що складає 3U. CubeSat важить приблизно 1,33 кг на 1U, тобто вага супутників Dove приблизно 4 кг. Вагова категорія наносупутників від 1 до 10 кг. Найменший CubeSat має розмір 0,25U, що становить лише кілька сотень грамів. Для порівняння, такі супутники як Landsat мають вагу понад 1500 кг. (Бурштинська, Х., & Петрик, Ю., 2023)

Основні характеристики супутників PlanetScope наведено у таблиці 3.9.

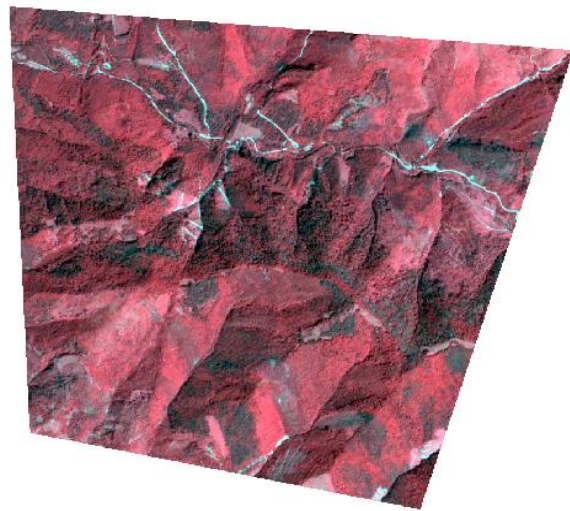
**Основні характеристики супутників PlanetScore**

	Dove-C	Dove-R	SuperDove
Інструмент	PS2	PS2.SD	PSB.SD
Висота орбіти	450-580 км		475 – 525 км
Спектральні канали	Blue: 455 - 515 нм Green: 500 - 590 нм Red: 590 - 670 нм NIR: 780 - 860 нм	Blue: 464 - 517 нм Green: 547 - 585 нм Red: 650 - 682 нм NIR: 846 - 888 нм	Coastal Blue 431- 452 нм Blue: 465-515 нм Green I: 513. - 549 нм Green: 547. - 583 нм Yellow: 600-620 нм Red: 650 - 680 нм Red-Edge: 697 - 713 нм NIR: 845 - 885 нм
Просторова розрізненість	3-4,1 м		3,4-4,2 м
Розмір на місцевості	24x8 км	24x16 км	32,5x19,6 км

Для дослідження використано два знімки із сузір'я супутників PlanetScore, отримані в серпні 2017 р. та вересні 2022 р. (рис.3.30).



*a)*



*б)*

***Рис. 3.30. Знімки із сузір'я супутників PlanetScope:***

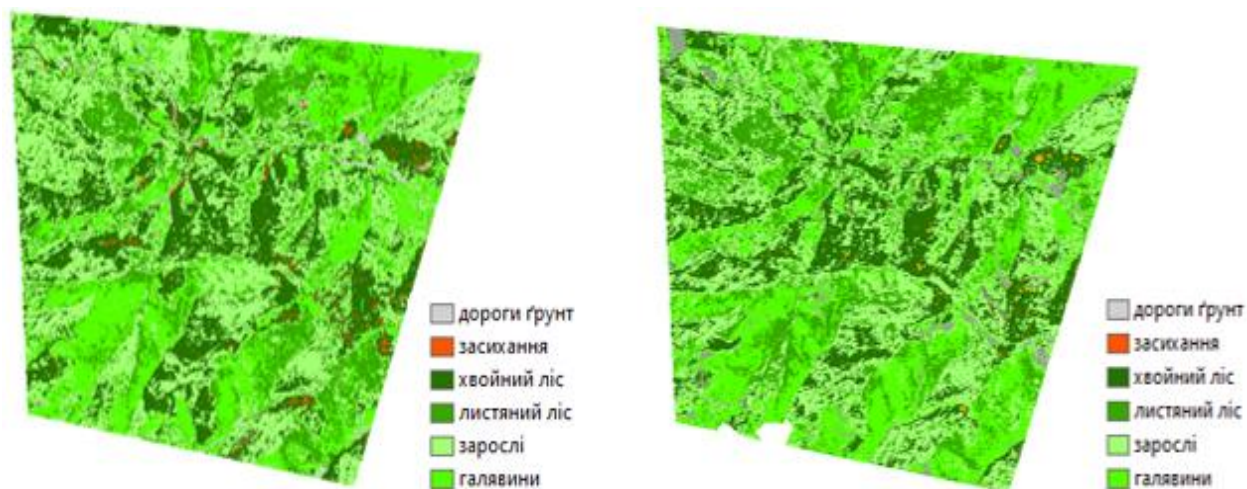
*a) Знімок із знімальної системи Dove-R (серпень 2017 р.)*

*б) Знімок із знімальної системи SuperDove*

*(вересень 2022 р.)*

У програмному середовищі ArcGIS 10.2 виконуємо контрольовану класифікацію за методом максимальної вірогідності. Як завіркову інформацію використовуємо ортофотоплан 2007 року, отриманий з Тухлянського лісництва, а також дані польових обстежень. Виділяємо такі класи: ґрунтові дороги, засихання, хвойний та листяний ліс, зарослі та

галявини. Результати контрольованої класифікації за синтезованими знімками наведено на рис. 3.31 (Бурштинська, Х., & Петрик, Ю., 2023).



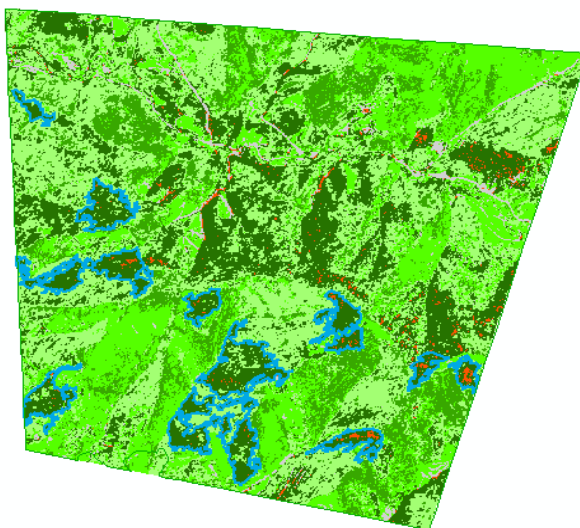
*Рис. 3.31. Результати контрольованої класифікації за знімками PlanetScope*  
Обчислені площі класів наведено у таблиці 3.10.

*Таблиця 3.10*

***Розраховані площі класів за результатами контрольованої класифікації***

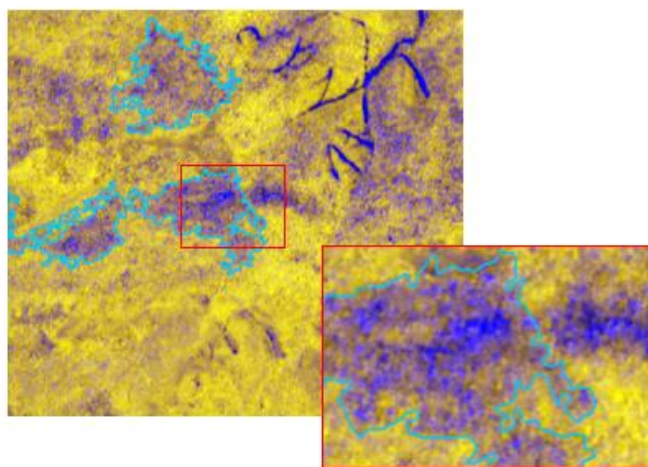
Клас	Площа, га		
	2017 р	2022 р	Різниця
Хвойний ліс	427,9	345,5	82,4
Листяний ліс	239,7	291,3	51,6
Зарослі	579,2	540,9	38,3
Галявини	372,6	425,7	53,1
Дороги, ґрунт	39,6	62,6	23
Вирубки	26,5	21,2	5,3
Засихання	14,6	5,9	8,7

Наступним етапом дослідження є вибір ділянок із хвойними масивами. Вибрано 14 таких ділянок на території лісництва, загальна площа цих ділянок – 120 га (рис. 3.32).



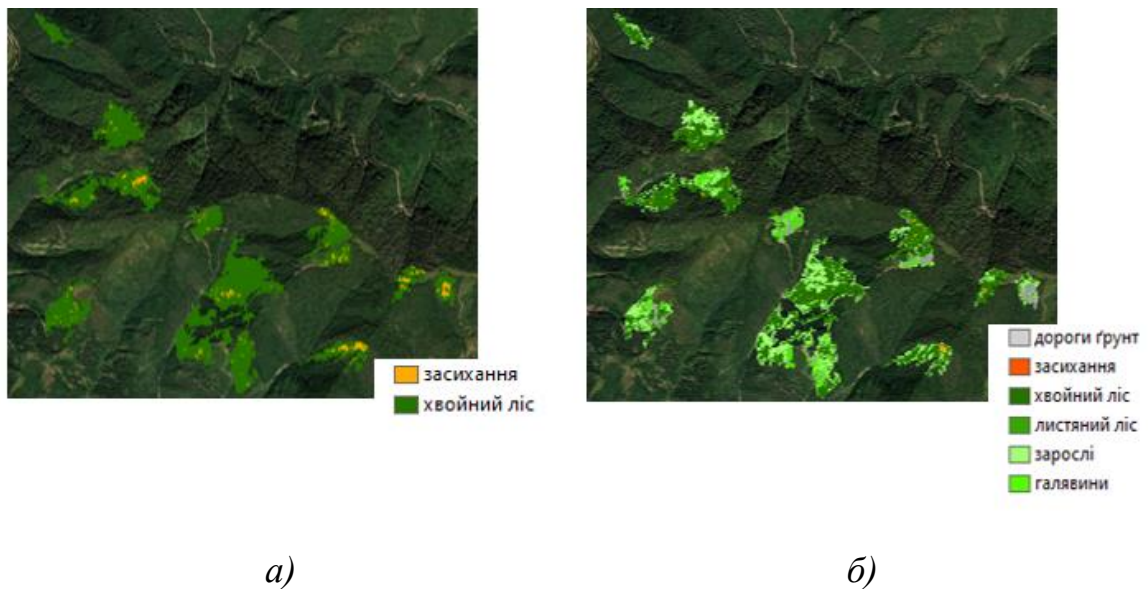
**Рис.3.32.** Вибір ділянок із хвойними масивами

Розраховано вегетаційні індекси - Normalized Difference Vegetation Index, Wide Dynamic Range Vegetation Index та Plant Senescence Reflectance Index. За цими індексами створено композиційні індексні зображення для аналізу стану хвойної рослинності (рис. 3.33).



**Рис. 3.33.** Композиційне індексне зображення із BI NDVI, WDRVI та PSRI (2017 р.)

За композиційними індексними зображеннями проведено контрольовану класифікацію з метою дослідження стану хвойних лісів. Результати наведено на рис. 3.34.



**Рис. 3.34.** Результати контрольованої класифікації для хвойних лісів за композиційними індексними зображеннями: а) 2017 р. б) 2022 р.

Площі обчислених класів за композиційними індексними зображеннями наведено у таблиці 3.11.

*Таблиця 3.11*

**Площі класів за композиційними індексними зображеннями**

Клас	Площа, га		Різниця
	2017 р.	2022 р.	
Хвойний ліс	113,4	64,1	49,3
Засихання	6,4	0,9	5,5
Листяний ліс	-	0,6	0,6
Зарослі	-	10,4	10,4
Галявини	-	36,7	36,7
Дороги	-	6,7	6,7

Оцінку точності класифікації для вибраних ділянок із хвойними лісами виконуємо за формулами 3.1 та 3.2.

Для обраних ділянок  $m_s = 3-5\%$ .

За результатами проведеного дослідження проаналізовано динаміку засихання хвойної рослинності, а також проведено аналіз зміни лісових масивів за 5 років. Встановлено, що площа хвойних лісів зменшилась на 82

га, площа листяних лісів збільшилась на 52 га, а також збільшилась площа ґрунтових доріг – 23 га. На частину знімка 2022 року, яка закрита хмарним покривом, накладено маску площею 7 га.

### **3.6. Висновки до розділу 3**

1) Для дослідження стану хвойних лісів Тухлянського лісництва використано комплексну методику, яка базується на проведенні контрольованої класифікації за знімками із Landsat 5 (2007 р.), Sentinel 2 (2017 і 2018 роки) та PlanetScope (серпень 2017 р. і вересень 2022 р.). Навчальні вибірки створено за результатами польових досліджень та ортофотоплану.

2) Проведено контрольовану класифікацію за знімком із супутника GeoEye. На підставі спектрофотометрування розраховано вегетаційні індекси для виявлення ділянок із пошкодженою рослинністю. Для створення композиційного індексного зображення обрано такі BI - NDVI, WDRVI та PSRI. Проаналізовано результати визначення площ на основі композиційного індексного зображення та синтезованого зображення із супутника GeoEye.

3) На підставі знімання з БПЛА виконано оцінку точності контрольованої класифікації. Встановлено що класифікація за композиційним індексним зображенням показує вищу достовірність (87–98%) ніж за синтезованим зображенням (76–96%). На ідентифікацію меж ділянок із засиханням за синтезованим зображенням значно впливають підстильна поверхня та спектральна яскравість сусідніх лісових об'єктів.

4) Для реалізації контрольованої класифікації методом максимальної вірогідності за знімками Landsat 5 (2007 р.) та Sentinel 2 (2017 і 2018 роки). Порівняння площ вказує на їх різницю між відповідними роками досліджень. Встановлено, що засихання дерев за 10 років (2007 -2017 рр.) збільшилось на площі в 223,5 га, а через інтенсивну вирубку засохлих

дерев, проведених в 2017-2018 рр., площа галявин збільшилась на 52,2 га. Також визначено нові ділянки із засиханням хвойних дерев.

5) Проведено контрольовану класифікацію за знімками із сузір'я PlanetScore. Встановлено, що за 5 років площа хвойних лісів на досліджуваній частині лісництва зменшилась на 49,3 га, також зменшилась кількість засихань – на 5,5 га. Водночас збільшились площі листяних насаджень (на 0,6 га), зарослів (на 10,4 га), галявин (на 36,7 га) та ґрунтових доріг (на 6,7га).



## ВИСНОВКИ

1. Уточнено методику моніторингу стану лісів за різночасовими даними дистанційного зондування та досліджено зміни площ лісових об'єктів упродовж 2007-2022 рр.

2. Проаналізовано основні статистичні методи роздільності класів земної поверхні за космічними зображеннями. Дослідження виконано для таких способів розділення класів: евклідової відстані, дивергенції, трансформованої дивергенції та відстані Джефріса-Матусіти. Ефективність кожного з методів роздільності класів встановлено на підставі аналізу розрахованих матриць із значеннями евклідової відстані, дивергенції, трансформованої дивергенції та відстані Джефріса-Матусіти. При аналізі статистичних методів розділення класів встановлено, що найефективнішим при класифікації лісів є метод трансформованої дивергенції.

3. Здійснено наземне спектрофотометрування для різних типів пошкодження хвойної рослинності з використанням спектро радіометра, проаналізовано спектральні криві, що дало можливість вибрати вегетаційні індекси NDVI, WDRVI та PSRI для виявлення пошкодженої хвойної рослинності різного ступеня.

4. Розраховано параметри та виконано знімання з БПЛА для вибору тестових ділянок з метою проведення оцінки точності визначення площ ділянок з пошкодженою хвойною рослинністю..

5. Створено композиційні зображення за вегетаційними індексами з метою покращення інтерпретаційних можливостей виявлення пошкодженої хвойної рослинності. Встановлено, що оцінка точності площ пошкодженої хвойної рослинності на зображеннях, отриманих за вегетаційними індексами, дає можливість на 2-11 % точніше визначати площі, зайняті пошкодженою хвойною рослинністю порівняно із синтезованими зображеннями, залежно від розміру та конфігурації ділянки.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Babushka, A., Burshtynska, Kh., & Denys, Yu. (2017). Classification of forests in the Precarpathian region using QuickBird-2 high resolution satellite image. *Geomatics, Landmanagement and Landscape*, No. 2, pp. 7-19.
- Badia, A., & Gisbert, M. (2020). LiDAR technology to map forest continuity: A municipality tool to prevent forest fires in a Wildland–Urban interface. *Applied geography*, 114, 102134.
- Budei, B. C., St-Onge, B., Hopkinson, C., & Audet, F. A. (2018). Identifying the genus or species of individual trees using a three-wavelength airborne lidar system. *Remote Sensing of Environment*, 204, 632-647. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.09.037>
- Burshtynska, K., Denys, Yu., & Polishchuk, B. (2019). Monitoring of coniferous forest drying in Precarpathian region using remote sensing data. *Book of abstract of XI International scientific-technical conference «Environmental engineering, photogrammetry, geoinformatics: modern technologies and development perspectives»*, Lublin, Poland, pp. 40-41.
- Burshtynska, Kh., Petryk, Yu., Polishchuk, B., & Shylo, Ye. (2019). Monitoring of coniferous forest drying in Precarpathian region using remote sensing data. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*. Volume 90, pp. 29-40. <https://doi.org/10.23939/istcgcap2019.90.029>
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to Remote Sensing*. Guilford Press.
- Ceccato, P., Flasse, S., Tarantola, S., Jacquemond, S. and Gregoire, J. (2001). Detecting vegetation water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 77, pp. 22–33
- Coops, N.C., Waring, R.H., Wulder, M.A. & White, J.C. (2009). Prediction and assessment of bark beetle-induced mortality of lodgepole pine using estimates of stand vigor derived from remotely sensed data. *Remote Sens. Environ.*, 113, 1058–1066. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.013>

- Dai, W., Yang, B., Dong, Z., & Shaker, A. (2018). A new method for 3D individual tree extraction using multispectral airborne LiDAR point clouds. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 144, 400-411.
- Dalla Corte, A. P., Souza, D. V., Rex, F. E., Sanquetta, C. R., Mohan, M., Silva, C. A., ... & Broadbent, E. N. (2020). Forest inventory with high-density UAV-Lidar: Machine learning approaches for predicting individual tree attributes. *Computers and Electronics in Agriculture*, 179, 105815.
- Davis, S. M., Landgrebe, D. A., Phillips, T. L., Swain, P. H., Hoffer, R. M., Lindenlaub, J. C., & Silva, L. F. (1978). *Remote sensing: The quantitative approach*. McGraw-Hill.
- Deep Green Ukraine. <https://www.deepforest.org.ua/map/> (last accessed: 9.09.2024)
- Dong, T., Zhang, X., Ding, Z., & Fan, J. (2020). Multi-layered tree crown extraction from LiDAR data using graph-based segmentation. *Computers and electronics in agriculture*, 170 (9), 105213
- Fukunaga, K. (1990). *Introduction to Statistical Pattern Recognition* (2nd ed.). Academic Press.
- Global Forest Watch. <https://www.globalforestwatch.org/> (last accessed: 15.08.2024)
- Graves, H. S. (1907). *Forest mensuration*. J. Wiley & sons.
- Hanewinkel, M., Cullmann, D. A., Schelhaas, M.-J., Nabuurs, G.-J., & Zimmermann, N. E. (2013). Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. *Nature Climate Change*, 3(3), 203-207. 10.1038/nclimate1687
- Hofeld, W. *Niedere und höhere praktische Stereometrie: oder kurze und leichte Messung und Berechnung aller regel-und unregelmäßigen Körper und selbst der Bäume im Walde...* (No Title).
- Hüffel G., 1919. *Économie forestière*, tome II. 2e édition. Paris : La Maison Rustique.

- Huffel, G. Dendrométrie, la formation du produit forestier, estimations et expertises. (No Title).
- Keleş, S., Durusoy, İ., & Çakir, G. (2017). Analysis of the changes in forest ecosystem functions, structure and composition in the Black Sea region of Turkey. *Journal of forestry research*, 28(2), 329-342. 10.1007/s11676-016-0322-2
- König, G. (1813). Anleitung zur Holztaxation.
- Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., Boardman, J. B., Heidebrecht, K. B., Shapiro, A. T., Barloon, P. J., & Goetz, A. F. H. (1993). The spectral angle mapper (SAM) algorithm. In Proceedings of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) Conference.
- Kukkonen, M., Maltamo, M., Korhonen, L., & Packalen, P. (2019). Comparison of multispectral airborne laser scanning and stereo matching of aerial images as a single sensor solution to forest inventories by tree species. *Remote sensing of environment*, 231, 111208.
- Liu, L., Lim, S., Shen, X., & Yebra, M. (2019). A hybrid method for segmenting individual trees from airborne lidar data. *Computers and electronics in agriculture*, 163, 104871.
- Marini, L., Hauser, M., Fuhrer, J., & Cherubini, P. (2012). Climate change-driven drought impacts on mortality and growth of Scots pine in Central Europe. *Forest Ecology and Management*, 295, 86-95.
- MCPFE (2002). Improved pan-european indicators for sustainable forest management as adopted by the MCPFE Expert Level Meeting, Vienna (Austria) October 7-8, 2002.
- Mohan, M., de Mendonça, B. A. F., Silva, C. A., Klauberg, C., de Saboya Ribeiro, A. S., de Araújo, E. J. G., ... & Cardil, A. (2019). Optimizing individual tree detection accuracy and measuring forest uniformity in coconut (*Cocos nucifera* L.) plantations using airborne laser scanning. *Ecological modelling*, 409, 108736.
- Müller, U. (1923). Lehrbuch der Holzmesskunde. P. Parey.

- Murray, J., Gullick, D., Blackburn, G. A., Whyatt, J. D., & Edwards, C. (2019). ARBOR: A new framework for assessing the accuracy of individual tree crown delineation from remotely-sensed data. *Remote sensing of environment*, 231, 111256. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111256>
- Overbeck, M. & Schmidt, M. (2012). Modelling infestation risk of Norway spruce by *Ips typographus* (L.) in the Lower Saxon Harz Mountains (Germany). *For. Ecol. Manag.* 266, 115–125.
- Ozkan, U. Y., Demirel, T., Ozdemir, I., Saglam, S., & Mert, A. (2020). Examining LiDAR–WorldView-3 data synergy to generate a detailed stand map in a mixed forest in the north-west of Turkey. *Advances in Space Research*, 65(11), 2608-2621.
- Perumal, K. & Bhaskaran, R. (2010). Supervised classification performance of multispectral images, *Journal of computing*, Volume 2, Issue 2 <https://doi.org/10.48550/arXiv.1002.4046>
- Richards, J. A., & Jia, X. (2006). *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction* (4th ed.). Springer.
- Schlich, W. (1911). *A Manual of Forestry: Forest management*. [By W. Schlich] 1895 (Vol. 3). Bradbury, Agnew & Company.
- Seidl, R., Müller, J., Hothorn, T., Bässler, C., Heurich, M. & Kautz, M. (2015). Small beetle, large-scale drivers: How regional and landscape factors affect outbreaks of the European spruce bark beetle. *J. Appl. Ecol.* 53, 530–540.
- Seidl, R., Schelhaas, M.-J., Lindner, M., & Lexer, M. J. (2014). Modelling bark beetle disturbances in a large scale context: A case study for the entire European spruce forest region. *Global Change Biology*, 20(7), 2499-2513.
- Sohn, Y., & Rebello, N.S. (2002). Supervised and unsupervised spectral angle classifiers. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 68(12). pp. 1271- 1280
- Tiemann, A., & Ring, I. (2018). Challenges and opportunities of aligning forest function mapping and the ecosystem service concept in Germany. *Forests*, 9(11), 691. <https://doi.org/10.3390/f9110691>

- Tischendorf, W. (1927). Lehrbuch der Holzmassenermittlung. P. Parey.
- Treitz, P., & Howarth, P. (2000). High spatial resolution remote sensing data for forest ecosystem classification: an examination of spatial scale. *Remote sensing of environment*, 72(3), 268-289. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00098-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00098-X)
- Trimble UX5/UX5 HP. (б. д.). Геоком. <https://trimble.org.ua/trimble-ux5/-/ux5-hp.html> (last accessed: 19.05.2024)
- Ukonmaanaho, L., Pitman, R., Bastrup-Birk, A., Breda, N., & Rautio, P. (2016). *Part XIII: Sampling and analysis of litterfall*. In UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre (Ed.), *Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests* (p. 14). Thünen Institute for Forest Ecosystems. Retrieved from <http://www.icp-forests.org/manual.htm>
- Unterberger, C., & Olschewski, R. (2021). Determining the insurance value of ecosystems: A discrete choice study on natural hazard protection by forests. *Ecological economics*, 180, 106866.
- WWF-Україна. <https://wwf.ua/> (last accessed: 27.09.2024)
- Young, R. A., & Giese, R. L. (2003). Introduction to forest ecosystem science and management. *International Forestry Review*, 5(4), 389-389.
- Андреєва, О. Ю., Вишневський, А. В., & Болюх, С. В. (2019). Динаміка популяцій короїдів у соснових лісах Житомирської області. *Науковий вісник НЛТУ України*. т. 29, № 8. с. 31–35.
- Андреєва, О. Ю., Гузій, А. І., & Вишневський, А. В. (2018). Поширення осередків масового розмноження короїдів у соснових насадженнях Рівненського полісся. *Науковий вісник НЛТУ України*. т. 28, № 3. с. 14–17. <https://doi.org/10.15421/40280302>
- Бардиш, Б., & Бурштинська, Х. (2014). Використання вегетаційних індексів для ідентифікації об'єктів земної поверхні. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, Вип. II (28), с. 82-88

- Барков, А. (2022). Вивчення впливу поширення шкідників на стан лісових насаджень Житомирщини. *Тези XVIII Всеукраїнської наукової on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених з міжнародною участю «Сучасні проблеми екології»*. Житомир: Житомирська політехніка. с. 31
- Блищик, В. І. (2014). *Продукція деревостанів вільхи клейкої Українського Полісся* (Дисертація канд. с.-г. наук: 06.03.02). Національний університет біоресурсів і природокористування України.
- Бондарчук Н. (2012). Актуальні питання правового режиму лісів України. *Часопис Київського університету права*, 4, 276-279
- Бурштинська, Х., & Петрик, Ю. (2023). Моніторинг стану хвойних лісів за матеріалами космічних знімків із сузір'я наносупутників PlanetScore. *Матеріали 10-мої міжнародної науково-технічної конференції: «Моніторинг довкілля, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології та перспективи розвитку»*, Львів, с. 20.
- Бурштинська, Х., Бабушка, А., Поліщук, Б., & Денис Ю. (2017). Методика класифікації лісів за космічними зображеннями високого розрізнення. *Матеріали 8-мої міжнародної науково-технічної конференції: «Моніторинг довкілля, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології та перспективи розвитку»*, Львів – Східниця, с. 95-98.
- Бурштинська, Х., Денис, Ю., Мадяр, Ю., & Поліщук, Б. (2016). Методика двоетапної класифікації лісів за космічними зображеннями високого розрізнення. *Збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК «Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва»*, Випуск 1 (31), с. 148-155.
- Бурштинська, Х., Денис, Ю., Поліщук, Б., & Тимчишин, М. (2018). Моніторинг лісових пожеж за космічними знімками середнього розрізнення. *Збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК «Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва»*, Випуск 1 (35), с. 179-184.

- Бурштинська, Х. В., Заяць, І. В., & Денис, Ю. В. (2018). *Використання вегетаційних індексів для покращення інтерпретаційних можливостей космічних зображень: Методичні рекомендації до виконання комплексної лабораторної роботи з курсу «Геоматика та дистанційні методи в дослідженні територій» для студентів II РВО*. Видавництво Львівської політехніки.
- Бурштинська, Х., Станкевич, С., Денис, Ю. (2019). *Фотограмметрія та дистанційне зондування. Книга 2: підручник*. Львів: Видавництво Львівської політехніки
- Бурштинська, Х., Поліщук, Б., & Ковальчук О. (2013). Дослідження методів класифікації лісів з використанням космічних знімків високого розрізнення. *Геодезія, картографія та аерофотознімання, Вип. 78*, 101–110.
- Василишин, Р. Д. (2007). *Продуктивність та надземна фітомаса лісостанів ялиці білої в Українських Карпатах* (дис. канд. с.-г. наук: 06.03.02). Національний аграрний університет, Київ
- Володимиренко, В. М. (2006). *Особливості росту та прогноз продуктивності штучних модальних ялинових деревостанів Українських Карпат*. (дис. канд. с.-г. наук: 06.03.02). Національний аграрний університет, Київ
- Волосецький Б. (2012). *Геодезія у природокористуванні*. Львів: Видавництво Львівської політехніки
- Втрата лісів в Україні. (2019). Зелений Фонд | Офіційний сайт. <https://greenfund.com.ua/2019/12/20/vtrata-lisiv-v-ukrayini/>
- Генсирук, С. А. (ред.) (1981). *Комплексное лесохозяйственное районирование Украины и Молдавии: монография*. Київ: Вид-во «Наук. думка»
- Генсирук, С. (2004). Бонітет лісу. У І. Дзюба, А. Жуковський, М. Железняк та ін. (Ред.), *Енциклопедія сучасної України*. Інститут енциклопедичних досліджень НАН України. <https://esu.com.ua/article-37005>



- Гірс, О. А. (1999). Нормативи товарності для березових деревостанів України. *Наук. Науковий вісник Національного аграрного університету*. Київ, 327-329.
- Гірс, О. А., & Киричок, Л. С. (2010). Нормативи динаміки товарної структури оптимальних ялинових деревостанів. *Науковий вісник НЛТУ України*, 20(13), 142-147.
- Гірс, О. А., Новак, Б. І., & Кашпор, С. М. (2004). *Лісовпорядкування*. Київ: Арістей
- Гриник, Г. Г. (2013). *Ріст та продуктивність головних лісотвірних порід Українських Карпат залежно від особливостей рельєфу*. (автореф. дис. д-ра с.-г. наук: 06.03.02). Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ.
- Гром, М. М. (2007). *Лісова таксація: підручник*. Вид. 2-ге, перероб. та доп. Львів: Вид-во НЛТУ України
- Дебринюк, Ю. М. (2011). Засихання смерекових лісів: причини та наслідки. *Науковий вісник НЛТУ України*, Вип. 21.16, с. 32-38
- Денис Ю. (2017). Дослідження ефективності методів розділення класів при класифікації лісів. *Збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК «Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва»*, Випуск II (34), с. 114-118.
- Денис, Ю., Бурштинська, Х., & Паштетник О. (2019). Моніторинг засихання хвойних лісів за різночасовими космічними знімками (на прикладі Тухлянського лісництва). *Збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК «Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва»*, Випуск I (37), с. 78-84.
- Денис, Ю., Бурштинська, Х., & Поліщук, Б. (2019). Моніторинг засихання хвойних лісів за різночасовими космічними знімками. *Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції «Геофорум-2019»*, Львів: Видавництво Львівської політехніки, с. 25-26.

- Денис, Ю., Паштетник, О., & Поліщук, Б. (2017). Дослідження стану хвойних лісів Прикарпатського регіону з використанням космічних знімків. *Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених «GeoTerrace-2017»*. Львів: Видавництво Львівської політехніки, с. 130-133
- Денис, Ю., Паштетник, О., & Поліщук, Б. (2018). Моніторинг засихання хвойних лісів з використанням космічних знімків (на прикладі Тухлянського лісництва). *Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених «GeoTerrace-2018»*, Львів: Видавництво Львівської політехніки, с. 182-183.
- Державне агентство лісових ресурсів України. (2019). *Міжнародна конференція щодо засихання соснових лісів: законодавчі обмеження в Україні блокують боротьбу з «біологічною пожежею»*. <https://www.kmu.gov.ua/news/mizhnarodna-konferenciya-shchodo-vsihannya-sosnovih-lisiv-zakonodavchi-obmezheniya-v-ukrayini-blokuyut-borotbu-z-biologichnoyu-pozhezheyu>
- Державне агентство лісових ресурсів України. <https://forest.gov.ua/> (Дата звернення: 17.09.2024)
- Кабінет Міністрів України. (2022). *Деякі питання реформування управління лісової галузі: Постанова Кабінету Міністрів України від 7 вересня 2022 р. № 1003*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1003-2022-%D0%BF#Text>
- Домашовець, Г. С. (2008). *Зональна біопродуктивність лісів Львівщини та її динаміка*. (дис. канд. с.-г. наук: 06.03.02). Національний аграрний університет, Київ
- Доскіч, В. (2015). *Проблеми лісових ресурсів України*. УНІАН. <https://www.unian.ua/ecology/1194415-problemi-lisovih-resursiv-ukrajini>.
- Дугін, С., Сибірцева, О., Голубов, С., & Дорофей, Є. (2019). Верифікація результатів обробки спектральних даних супутника Sentinel-2A, наземного спектро радіометра ASD FieldSpec® 3FR і системи реєстрації мінливості параметрів середовища DJI STS-VIS. *Український журнал*

дистанційного зондування Землі, 21, с. 29–39.  
<https://doi.org/10.36023/ujrs.2019.21.147>

- Жиленев М. Ю. (2009). Обзор применения мультиспектральных данных ДЗЗ и их комбинаций при цифровой обработке, *Геоматика №3*, с. 59-64
- Жуковський, О. В., Краснов, В. П., Іванюк, І. Д., Курбет, Т. В., & Зборовська, О. В. (2022). Поширення короїда верхівкового (*Ips acuminatus* (Gyllenhal, 1827) і трахеомікозу хвойних порід стовбуром сосни звичайної. *Науковий вісник НЛТУ України. Вип. 32 (4)*. с. 38-43.
- Засихання соснових лісів набули катастрофічних масштабів, – Мінагрополітики. (2019). Агрополіт. <https://agropolit.com/news/12523-vsihannya-sosnovih-lisiv-nabuli-katastrofichnih-masshtabiv--minagropolitiki> (Дата звернення: 28.04.2021)
- Зацерковний, В., Оберемок, Н., & Ягорлицька, К. (2017). Застосування технологій ГІС і ДЗЗ в задачах моніторингу лісових ценозів. *Наукоємні технології, Вип. № 4 (36)*, с. 350-357
- Зацерковний, В., Тішаєв, О., & Шищенко, О. (2016). Застосування матеріалів дистанційного зондування в завданнях моніторингу лісових пожеж і кількісного оцінювання рослинності. *Наукоємні технології, Вип. № 1 (29)*, с. 42-47.
- Заячук, В. Я. (2008). *Дендрологія: підручник*. Львів: Апріорі, 656.
- Кабінет Міністрів України. (2023). *Публічний звіт голови Державного Агентства Лісових Ресурсів України за 2023 рік*. [https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/17civik2018/zvit2023/zvit\\_lis\\_%202023.pdf](https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/17civik2018/zvit2023/zvit_lis_%202023.pdf)
- Кавун, Е. & Логінова С. (2016). Географо-екологічні аспекти поширення стовбурових шкідників хвойних порід дерев в межах Житомирської та Вінницької областей та їх динаміка. *Сільське господарство та лісівництво. Том. (2)*. с. 120-128.
- Каганяк, Ю. Й. (2000). *Будова та продуктивність мішаних культур дуба червоного (*Quercus borealis* Michx.) у Західному Лісостепу України*.

- (Автореф. дис... канд. с.-г. наук : 06.03.02). Національний аграрний університет, Київ
- Каганяк, Ю. Й., Гриник, Г. Г., & Лавний, В. В. (2002). Моделювання твірної стовбурів дуба червоного та ясена звичайного. *Науковий вісник НЛТУ України*, 12(2), 65-68.
- Карабчук, Д., Часковський, О., Осадчук, Л., Скольський, І., Гаврилюк, В., Капля, Н., Довбенко, В., & Пивовар, Т. (2024). *Запобігання незаконному вирубуванню лісів в Україні: Звіт про результати моніторингу, здійснений експертами ГО "ЛіС" за 2020-2023 рр.* Львів
- Кашпор, С. М. (1999). Методичні основи складання нормативів динаміки товарної структури насаджень. *Науковий вісник Національного аграрного університету. Вип, 17*, с. 265-268.
- Кашпор, С. М., & Строчинський, А. А. (2013). *Лісотаксаційний довідник*. К.: Видавничий дім «Вініченко».
- Кодекс України. (1994). *Лісовий кодекс України*.  
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3852-12>
- Кодекс України. (2002). *Земельний кодекс України*.  
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14>
- Котляревська Н. (2010). Лісове господарство України: розвиток і проблеми сьогодення. *Актуальні проблеми економіки, Вип. 107 (№5)*, С. 30-36.
- Кохан С., & Востоков А. (2009). *Дистанційне зондування Землі: теоретичні основи: підручник*. Київ: Вища школа
- Кринов Е.Л. (1947). *Спектральная отражательная способность природных образований*. Москва-Ленинград: АН СССР
- Крылов, А., Соколев А., & Владимирова Н. (2011). Выявление очагов короеда-типографа в Московской области с использованием снимков Landsat. *Лесной вестник, Вип. 4*, с. 54-60
- Лакида, П. І., Бокоч, В. В., Васишин, Р. Д., & Терентьев, А. Ю. (2015). *Біопродуктивність лісових фітоценозів Карпатського національного*

- природного парку*: монографія. Корсунь-Шевченківський: ФОП Гаврищенко ВМ.
- Лакида, П. І., Лашенко, А. Г., & Лашенко, М. М. (2006). *Біологічна продуктивність дубових деревостанів Поділля*: монографія. К.: ННЦ ІАЕ
- Логінова, С. (2018). Прогноз масового розмноження стовбурових шкідників хвойних порід дерев в Україні та його актуальність. *Сільське господарство і лісівництво. № 11*. с. 142-151.
- Лялько В., Попов М. (2006). *Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування*. К.: Наукова думка
- Миклуш, С. І. (2011). *Рівнинні букові ліси України: продуктивність та організація сталого господарства*: монографія. Львів: ЗУКЦ
- Миклуш, С., Гаврилюк, С., & Часковський, О. (2012). *Дистанційне зондування Землі в лісовому господарстві*. Львів: ЗУКЦ
- Миронюк, В. В. & Свинчук В. А. (2014). *Конспект лекцій з лісової таксації*. К.: Вид-во НУБіП України
- Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. (2020). *Звіт про стратегічну екологічну оцінку Державної стратегії управління лісами України до 2035 року*. <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/04/StrategiyaFinal2.pdf>
- Морозюк, О. В. (2009). *Біопродуктивність лісів Черкащини та її динаміка*. (дис... канд. с.-г. наук : 06.03.02). Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ.
- Об'єктивна інформація щодо лісів. (2024). Товариство лісівників України. <https://tlu.kiev.ua/nasha-dijalnist/profesiino-pro-lis/objektivna-informacija-shchodo-lisiv.html> (Дата звернення: 17.08.2024)
- Орлов М. (1913). *Лесное хозяйство в Харьковских имениях Л. Е. Кениг*. С.-Петербург
- Пастернак, В. П. (2011). *Біопродуктивність лісів північного сходу України в контексті змін клімату*. (дис. д-ра с.-г. наук: 06.03.02, 06.03.03).

Національний університет біоресурсів і природокористування України,  
Київ.

Петрик, Ю., Бурштинська, Х., & Поліщук, Б. (2024). Дослідження стану лісів Прикарпатського регіону за космічними зображеннями з використанням методу контрольованої класифікації. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва, Випуск I (47)*, с. 179-185 [www.doi.org/10.33841/1819-1339-1-47-179-185](http://www.doi.org/10.33841/1819-1339-1-47-179-185)

Платформа відновлення лісів України.  
<https://opentech.softserveinc.com/uk/projects/platform-for-forest-restoration-in-ukraine> (дата звернення: 26.08.2024)

Площа загибелі лісових насаджень в Україні за роками. (2023). Скільки-скільки? URL: <https://skilky-skilky.info/datasets/ploshcha-zahybeli-lisovykh-nasadzhen/> (Дата звернення: 05.09.2024)

Поліщук, П., Волошина, Н., & Сятиня, І. (2019). Шляхи вирішення проблеми «біологічної пожежі». *VII-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю (Екологія / Ecology – 2019). (Електронне мережне наукове видання): збірник наукових праць*. Вінниця: ВНТУ. с. 128

Польовий спектрометр ASD FieldSpec® 3 FR. (б. д.). Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України». <https://www.casre.kiev.ua/uk/ccseu/178-asd-fieldspec-3-fr-®> (Дата звернення: 06.06.2019)

Попов, В. П. (ред.) (1968). *Физико-географическое районирование Украинской ССР*. Изд-во Киев. гос. ун-та

Кабінет Міністрів України. (2007, 16 травня). *Про затвердження порядку поділу лісів на категорії та виділення особливо захисних лісових ділянок* (Постанова № 733). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/733-2007-%D0%BF#Text>

- Кабінет Міністрів України. (1995, 27 липня). *Про затвердження Санітарних правил в лісах України* (Постанова № 555). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-95-%D0%BF#Text>
- Кабінет Міністрів України. (2021, 29 грудня). *Про схвалення Державної стратегії управління лісами України до 2035 року* (Розпорядження № 1777-р). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1777-2021-p#Text>
- Пузріна, Н. В., Мешкова, В. Л., Миронюк, В. В., Бондар, А. О., Токарева, О. В., & Бойко Г. О. (2021). *Моніторинг шкідливих організмів лісових екосистем: навчальний посібник*. НУБіП України
- Радченко, О., Тарабан, Д., & Карпець, Ю. (2023). Переважаючі чинники ураження і пошкодження лісових насаджень в рівнинних лісах України. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Лісівництво, деревообробка та озеленення: стан, досягнення і перспективи»*. Харків: ДБТУ. с. 65
- Свідзінська, Д. В. (2014). *Методи геоекологічних досліджень: геоінформаційний практикум на основі відкритої ГІС SAGA: навчальний посібник*. Логос
- Селінний, М. М. & Корма, О. М. (2019). Лісове господарство України: сучасний стан та перспективи розвитку. *Modern Economics*. 2, 17(2019), 211-217. [https://doi.org/10.31521/modecon.V17\(2019\)-34](https://doi.org/10.31521/modecon.V17(2019)-34).
- Сидельник Н. Я., Пушкин А. А., Ковалевский С. В. (2018). Картирование поврежденных лесных насаждений и объектов лесохозяйственных мероприятий с использованием материалов космической съемки и ГИС-технологий. *Труды БГТУ, Вып. №1*, с. 5-12
- Станкевич С. А., Титаренко О. В., Шкляр С. В. (2010). Ефективна обробка даних польового спектрометрування в природоресурсних задачах. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, Вып. № 12*, с. 110-115
- Строчинський, А. А., & Кашпор, С. М. (2007). *Товарна структура деревостанів основних лісоутворювальних порід: монографія*. НАУ

- Строчинський, А. А., Кашпор, С. М., & Поляков, О. В. (2007). *Моделі розмірно-якісної структури об'єму стовбурів основних лісоутворювальних порід*. НАУ
- Товариство лісівників України (2024). Про Товариство Лісівників України. <https://tlu.kiev.ua/golovna.html> (Дата звернення: 17.09.2024)
- Тухлянське лісництво. (2013). *Офіційний сайт Державного підприємства «Славське лісове господарство»*. <http://www.slavsklis.com.ua/index.php/lisnytstva/tukhlianske> (Дата звернення: 18.01.2019)
- Цурик, Є. І. (2008). *Таксація динаміки деревостанів*: навч. посібн. НЛТУ України
- Швиденко, А. З., Воронін, В. М., & Новохатний, О. П. (1971). Деякі питання геометрії поперечних перерізів стовбурів сосни. *Наукові праці Української сільськогосподарської академії*. Київ, с. 100-101.
- Шпак, А. В. (2012). Порівняльний аналіз методів класифікації лісів гірської місцевості за матеріалами знімання супутника RapidEye. *Вісник Астрономічної школи*, том 8, № 2. с. 212–216.



## ДОДАТОК А

### Площа загибелі лісових насаджень за 2010-2022 роки в Україні

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021 <sup>2</sup>	2022 <sup>2</sup>
Площа загибелі лісових насаджень (га)	20864	16414	20187	16428	17642	27768	19405	20111	15069	12398	39756	9518	12390
<b>пошкодження шкідниками</b>	1295	1505	1376	1492	1181	1183	2332	5439	8762	6223	5492	2785	3690
<b>хвороби лісу</b>	5632	6428	6463	6585	6638	7258	5921	2334	2464	2808	2079	1503	1429
<b>вплив несприятливих погодних умов</b>	10113	6604	8469	7349	5991	8350	8042	3065	2605	2817	3919	2524	902
<b>лісоів пожежі</b>	3127	909	2915	285	2290	8564	1591	8763	1085	395	28056	2607	6310
<b>інші причини</b>	697	968	964	717	1542	2413	1519	510	153	155	210	99	59
<b>пошкодження дикими тваринами</b>									59	112	70	51	41
<b>антропогенні фактори</b>									81	41	140	47	15
<b>надмірна вологість</b>									13	2		1	3

1. Дані за 2014-2022 роки наведено без врахування тимчасово окупованої території Автономної Республіки Крим, м. Севастополя і частини тимчасово окупованих територій у Донецькій та Луганській областях.

2. Дані можуть бути уточнені.