

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет аграрних технологій та екології

(повне найменування факультету)

Кафедра лісового господарства

(повна найменування кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»
Оцінка санітарного стану лісів НПП «Цуманська
пуща» із застосуванням супутникових засобів
дистанційного зондування Землі

спеціальність 205 Лісове господарство

(цифр і назва спеціальності)

освітня програма «Лісове господарство»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ЛГм-21
ГРИНЕВИЧ Вадим Віталійович

(підпис)

Керівник:
к.т.н., доцент
ГЕРАСИМЧУК Олександр Павлович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 2025 р.
д.с.-г.н., професор,
гарант освітньої програми:
МАЗЕПА Василь Григорович

(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет *аграрних технологій та екології*

Кафедра *лісового господарства*

Ступінь вищої освіти: *магістр*

Галузь знань: *20 Аграрні науки і продовольство*

Спеціальність: *205 Лісове господарство*

Освітня програма: *«Лісове господарство»*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ *В. Волянський*

«__» _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Гриневичу Вадиму Віталійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи

«Оцінка санітарного стану лісів НПП «Цуманська пуца» із застосуванням супутникових засобів дистанційного зондування Землі»

Керівник роботи: *Герасимчук Олександр Павлович, к.т.н., доцент*

затверджені наказом закладу вищої освіти від «28» червня 2025 р. №427//01-07

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи «09» грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи *Супутникові знімки (Satellite); Лісовпорядні матеріали НПП «Цуманська пуца» (дані 2017 року); Векторні плани території, створені у OGIS.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що потрібно розробити):

Розділ 1. Огляд літератури за темою оцінки санітарного стану лісів із використанням даних ДЗЗ.

Розділ 2. Програма, методика та об'єкт досліджень

Розділ 3. Природні умови, лісовий фонд та лісогосподарська діяльність НПП

Розділ 4 Оцінка санітарного стану лісів НПП «Цуманська пуца» на основі інтеграції наземних та супутникових даних

Висновки та рекомендації. Список використаних джерел. Додатки

5. Перелік графічного матеріалу:

1. Мета, завдання, об'єкт, предмет, дослідження. 2. Санітарний стан лісів як об'єкт лісівничих досліджень

3. Сучасний стан використання дистанційного зондування Землі в оцінці санітарного стану лісів. 4. Наземні та супутникові індикатори санітарного стану лісів

5. Програма та методика досліджень

6. Територіальна організація Ківерцівського НПП «Цуманська пуца»

7. Природньо-кліматичні умови території Ківерцівського НПП «Цуманська пуца»

8.9. Лісовий фонд Ківерцівського НПП «Цуманська пуца» та його структура

10. Лісогосподарська діяльність на території Ківерцівського НПП «Цуманська пуца»

11. Підготовка даних та характеристика вибраних кварталів парку

12. Результати оцінки санітарного стану лісів основі інтеграції наземних та супутникових даних. 13. Висновки та рекомендації

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Розділ 1,2,3,4</i>	<i>Герасимчук О.П.</i>		

7. Дата видачі завдання «30» серпня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Обґрунтування теми</i>	<i>13.09.2025 р.</i>	
2	<i>Розділ 1. Огляд літератури за темою оцінки санітарного стану лісів із використанням даних ДЗЗ</i>	<i>27.09.2025 р.</i>	
3	<i>Розділ 2. Програма, методика та об'єкт досліджень</i>	<i>11.10.2025 р.</i>	
4	<i>Розділ 3. Природні умови, лісовий фонд та лісгосподарська діяльність ківерцівського НПП «Цуманська пуця»</i>	<i>08.11.2025 р.</i>	
5	<i>Розділ 4. Оцінка санітарного стану лісів НПП «Цуманська пуця» на основі інтеграції наземних та супутникових даних</i>	<i>29.11.2025 р.</i>	
6	<i>Висновки та рекомендації</i>	<i>09.12.2025 р.</i>	
7	<i>Формування списку використаних джерел</i>	<i>04.12.2025 р.</i>	
8	<i>Формування додатків</i>	<i>04.12.2025 р.</i>	
9	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	<i>06.12.2025 р.</i>	
10	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	<i>06.12.2025 р.</i>	
11	<i>Представлення кваліфікаційної роботи магістра до захисту</i>	<i>09.12.2025 р.</i>	

Здобувач вищої освіти

_____ (підпис)

Гриневич В.В.
(прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

_____ (підпис)

Герасимчук О.П.
(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Гриневич В.В. Оцінка санітарного стану лісів НПП «Думанська пуща» із застосуванням супутникових засобів дистанційного зондування Землі. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Лісове господарство» спеціальності 205 «Лісове господарство». Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2024.

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків і рекомендацій, списку використаних джерел, додатків.

У роботі розглянуто можливості інтегрованої оцінки санітарного стану лісів Ківерцівського НПП «Думанська пуща» на основі поєднання наземних показників та супутникових даних дистанційного зондування Землі. Для просторового аналізу сформовано ГІС-основу (оцифрування квартальної сітки та виділів) і відібрано репрезентативні квартали різних функціональних зон. За даними Sentinel-2 у QGIS виконано розрахунок NDVI та зональну статистику в межах виділів. Встановлено обернений зв'язок між індексом санітарного стану та NDVI: та побудовано регресійну модель, що свідчить про високу придатність NDVI для оперативного моніторингу осередків ослаблення деревостанів.

Ключові слова: САНІТАРНИЙ СТАН ЛІСІВ, ІНДЕКС САНІТАРНОГО СТАНУ, ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ, SENTINEL-2, NDVI, ГІС, QGIS, НПП «ДУМАНСЬКА ПУЩА».

ABSTRACT

Hrynevych V. V. Forest Health Assessment in Kivertsi National Nature Park «Tsuman Puscha» Using Satellite Remote Sensing. Manuscript.

Master's thesis of OP «Forestry» specialty 205 «Forestry». Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The master's thesis consists of an introduction, four chapters, conclusions and recommendations, a list of used sources, and appendices.

The study examines the possibilities of an integrated assessment of the sanitary condition of forests in the Kivertsi National Nature Park “Tsumanska Pushcha” based on the combination of ground-based indicators and satellite remote sensing data. For spatial analysis, a GIS framework was developed (digitization of the compartment grid and forest stands), and representative compartments from different functional zones were selected. Using Sentinel-2 data in QGIS, NDVI was calculated and zonal statistics were performed within forest stands. An inverse relationship between the sanitary condition index and NDVI was established, and a regression model was developed, indicating the high suitability of NDVI for operative monitoring of forest stand weakening hotspots.

Keywords: FOREST SANITARY CONDITION; SANITARY CONDITION INDEX; REMOTE SENSING; SENTINEL-2; NDVI; GIS; QGIS; KIVERTSI NATIONAL NATURE PARK «TSUMANSKA PUSHCHA».

ЗМІСТ

Вступ	7
Розділ 1. Огляд літератури за темою оцінки санітарного стану лісів із використанням даних ДЗЗ	10
1.1. Санітарний стан лісів як об'єкт лісівничих досліджень.....	10
1.2. Класичні підходи до санітарної оцінки деревостанів.....	16
1.3. Сучасний стан використання дистанційного зондування Землі в оцінці санітарного стану лісів.....	20
1.4. Наземні та супутникові індикатори санітарного стану лісів.....	25
Розділ 2. Програма, методика та об'єкт досліджень	29
2.1. Загальна програма досліджень та схема оцінки санітарного стану лісів НПП «Цуманська пуша».....	29
2.2. Об'єкт, предмет та інформаційна база.....	32
2.3. Методика досліджень.....	34
Розділ 3. Природні умови, лісовий фонд та лісогосподарська діяльність НПП «Цуманська пуша»	38
3.1. Природно-географічна та просторово-функціональна характеристика Ківерцівського НПП «Цуманська пуша».....	38
3.2. Природно-кліматичні та гідрологічно-грунтові умови Ківерцівського НПП «Цуманська пуша».....	43
3.3. Лісовий фонд Ківерцівського НПП «Цуманська пуша» та його структура.....	47
3.4. Лісогосподарська діяльність у межах Ківерцівського НПП «Цуманська пуша».....	55
Розділ 4 Оцінка санітарного стану лісів НПП «Цуманська пуша» на основі інтеграції наземних та супутникових даних	61
4.1. Підготовка даних та характеристика вибраних кварталів парку.....	61
4.2. Наземна оцінка санітарного стану деревостанів парку.....	63
4.3. Супутниковий аналіз: вегетаційний індекс NDVI та визначення стану насаджень.....	65

Висновки та рекомендації	70
Список використаних джерел	72
Додатки	78

ВСТУП

Актуальність теми. Санітарний стан лісів Волинського Полісся останніми роками дедалі більше визначається поєднанням кліматичних аномалій, гідрологічних змін, осередків шкідників і хвороб та зростанням рекреаційного навантаження, що підвищує ризики ослаблення й деградації деревостанів. Для Ківерцівського НПП «Цуманська пуща», де лісові екосистеми виконують одночасно природоохоронні, рекреаційні та господарські функції, оперативний і доказовий моніторинг здоров'я насаджень є критично важливим для планування санітарно-оздоровчих заходів і запобігання втратам біорізноманіття та екосистемних послуг [2]. Традиційні наземні лісопатологічні обстеження забезпечують високу точність, однак є трудомісткими, просторово обмеженими та не завжди дають змогу швидко відстежувати динаміку стану насаджень на великих площах. Натомість супутникове дистанційне зондування (зокрема Sentinel-2) дозволяє регулярно отримувати просторово суцільні дані та оцінювати стан крон за спектральними (вегетаційними) індексами (NDVI тощо), але потребує калібрування й перевірки за наземними індикаторами [4]. Саме тому актуальним є інтегрований підхід, коли супутникові показники узгоджують із наземними оцінками на основі вже наявних матеріалів пробних площ [25; 26], а далі поширюють встановлені залежності на ширші території парку в ГІС-середовищі

Мета дослідження. Оцінити санітарний стан лісів НПП «Цуманська пуща» із застосуванням супутникових засобів дистанційного зондування Землі шляхом інтеграції наземних показників та супутникових вегетаційних індексів.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати сучасні підходи до санітарної оцінки деревостанів і чинники, що визначають погіршення їх стану; узагальнити можливості супутникових методів оцінювання здоров'я лісів та вибір інформативних індексів. Обґрунтувати доцільність інтеграції наземних індикаторів (ІС, категорії

життєвості) із супутниковими показниками для задач моніторингу санітарного стану лісів НПП.

2. Сформувати програму досліджень, визначити об'єкт і інформаційну базу, систематизувати наявні результати наземних санітарних обстежень. Описати методику розрахунку та інтерпретації індексу санітарного стану I_c і алгоритм підготовки та обробки супутникових даних (Sentinel-2), необхідний для подальшого зіставлення наземних і дистанційних показників.

3. Надати природно-географічну та просторово-функціональну характеристику НПП «Цуманська пуща» і визначити передумови формування його лісових екосистем. Проаналізувати структуру лісового фонду та особливості лісгосподарської діяльності в різних функціональних зонах парку як контекст для інтерпретації санітарного стану насаджень

4. Підготувати ГІС-основу дослідження (оцифрування картосхеми, формування геобаз) та відібрати репрезентативні квартали різних функціональних зон для детального аналізу. Розрахувати NDVI, виконати зональну статистику й встановити зв'язок між I_c та NDVI (кореляцію та регресію).

Об'єктом дослідження є лісові екосистеми Ківерцівського національного природного парку «Цуманська пуща», розташованого у межиріччі Стиру й Горині в південній частині Волинського Полісся.

Предметом дослідження виступає санітарний стан лісових насаджень НПП «Цуманська пуща» та його відображення у системі наземних і супутникових показників. До предметної області належать: індекс санітарного стану деревостанів, розподіл дерев за категоріями життєвого стану, частка ослаблених, сильно ослаблених і таких, що всихають, дерев, основні типи ушкоджень, а також значення вегетаційного індексу NDVI, розраховане за даними Sentinel-2 у межах лісових виділів парку.

Практична значимість. Запропонований підхід інтеграції наземних показників (індексу санітарного стану) із супутниковими даними та ГІС-аналізом дозволяє оперативно виявляти і картографувати осередки ослаблення

насаджень у межах НПП «Думанська пуща». Отримані результати можуть бути використані адміністрацією парку та лісогосподарськими структурами для планування санітарно-оздоровчих заходів відповідно до чинних Санітарних правил, а також для моніторингу динаміки стану лісів у часі [2; 14; 19–21; 25; 26].

Апробація роботи. Основні положення та результати магістерського дослідження апробовано шляхом публікації наукової статті Гриневича В. В., Герасимчука О. П. «Методичні підходи до оцінки санітарного стану лісів НПП «Думанська пуща» із використанням даних дистанційного зондування Землі» у збірнику «Студентський науковий вісник», випуск 54 [1].

Використання інструментів штучного інтелекту. Під час роботи застосовувалися інструменти генеративного штучного інтелекту як допоміжний засіб для мовного редагування, стилістичного упорядкування та форматування тексту (зокрема ChatGPT (OpenAI)), а також для уточнення формулювань та опрацювання наукових джерел. Інструменти ШІ не використовувалися як джерело первинних емпіричних даних та для підміни авторського аналізу. Усі твердження, інтерпретації, висновки й результати дослідження сформульовані автором на основі власного опрацювання матеріалів, а згенеровані ШІ пропозиції були перевірені на достовірність та коректність цитування.

Публікації. Гриневич В. В. Методичні підходи до оцінки санітарного стану лісів НПП «Думанська пуща» із використанням даних дистанційного зондування Землі / В. В. Гриневич, О. П. Герасимчук // Студентський науковий вісник = Student Scientific Bulletin = Studencki Biuletyn Naukowy : наук. зб. – Вип. 54. – Луцьк : ЛНТУ, 2025.

Структура та обсяг роботи. Робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 92 сторінки. Основний текст займає 65 сторінок, містить 13 таблиць, 28 рисунків і 6 додатків.

Список використаних джерел містить 38 найменувань, оформлених відповідно ДСТУ.

РОЗДІЛ I

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ОЦІНКИ САНІТАРНОГО СТАНУ ЛІСІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ДАНИХ ДЗЗ

1.1. Санітарний стан лісів як об'єкт лісівничих досліджень

Санітарний стан лісу на сьогодні розглядають як один із ключових інтегральних показників стійкості лісових екосистем до дії природних та антропогенних чинників. У сучасних умовах кліматичних змін, інтенсифікації лісокористування та поширення шкідливих організмів саме санітарний стан використовується як «узагальнюючий діагноз» для оцінки життєздатності деревостанів, їх здатності виконувати екологічні, захисні та соціально-економічні функції [1; 3; 4].

У світовій літературі близьким за змістом є поняття «forest health» (здоров'я лісу), яке трактують як здатність лісової екосистеми підтримувати свою структуру, продуктивність, біорізноманіття та стійкість до зовнішніх впливів у часі [3; 4]. В українській практиці поряд з терміном «санітарний стан лісу» вживають також поняття «фітосанітарний стан», «лісопатологічний стан», однак у нормативних документах та відомчій звітності базовим є саме термін «санітарний стан».

Згідно з «Санітарними правилами в лісах України» санітарний стан лісів і деревини є об'єктом постійного державного та відомчого контролю й оцінюється з урахуванням наявності сухостою, дерев, що всихають, вітровалу, бурелому, осередків шкідників і хвороб, а також захаращеності лісу [2]. У пояснювальних матеріалах до змін «Санітарних правил...» санітарний стан лісу визначають як якісну характеристику насадження за наявністю дерев різних категорій стану та ступенем ураження їх шкідливими чинниками, що узагальнює інформацію про життєвість дерев, пошкодження стовбурів і крон, наявність сухостою та відмерлої деревини.

У наукових роботах українських дослідників санітарний стан трактують як інтегральний показник, що відображає не лише співвідношення дерев за

категоріями життєвого стану, а й рівень порушеності структури деревостану, ступінь його ураженості шкідниками та хворобами, обсяги сухоостою, захаращеність лісосічних і міжсічних площ, розвиток небажаної підліскової та трав'яної рослинності [1; 3; 5].

Так, Вікторія Мельник, оцінюючи санітарний стан соснових насаджень зони безумовного відселення Українського Полісся, використовує індекс санітарного стану, який враховує частку дерев різних категорій, та показники розподілу дерев за життєвістю (класи Крафта) і товарністю деревини [3]. Подібні підходи застосовуються і в дослідженнях фітосанітарного стану соснових лісів Західного Полісся та Київського зеленого кільця, де санітарний стан виступає основою для обґрунтування лісогосподарських заходів та попередження масового всихання насаджень [5; 6].

Базовим елементом оцінки санітарного стану є категорії життєвого стану дерев, запроваджені лісопатологічними інструкціями й закріплені у «Санітарних правилах...» та інших методичних рекомендаціях. У переважній більшості робіт використовується шестибальна шкала, де:

1. I категорія – здорові дерева: добре розвинена крона, відсутні ознаки ослаблення, механічних пошкоджень та ураження шкідниками й хворобами.

2. II категорія – ослаблені: незначне зрідження крони, окремі сухі гілки, слабо виражені ознаки ураження чи стресу, але зберігається потенціал до відновлення.

3. III категорія – сильно ослаблені: помітне зрідження та прозорість крони, значна частка сухих гілок, виражені симптоми пошкодження стовбурів чи кореневої системи.

4. IV категорія – всихаючі: швидке погіршення стану, масове пожовтіння та опадання хвої чи листя, активний розвиток стовбурових шкідників або некрозів кори.

5. V категорія – сухостій недавній: дерева, що відмерли протягом останніх 1–2 років, з відносно неушкодженою корою.

6. VI категорія – сухостій старий: давномертві дерева з відлущеною корою,

початковими стадіями розкладу деревини [2; 5; 7].

На рівні деревостану санітарний стан визначають за: часткою дерев кожної з перелічених категорій (у відсотках до загальної кількості дерев); розрахунковим індексом санітарного стану (I_c), який є зваженою за категоріями середньою величиною й змінюється від одиниці (здорові насадження) до чотирьох-шести (насадження, що підлягають суцільній санітарній рубці) [3; 5]; запасом сухоостою та дерев, що всихають, у $m^3/га$; площею і структурою осередків шкідників і хвороб; ступенем засміченості та захаращеності площ.

Для наочності основні індикатори санітарного стану деревостанів можна звести в узагальнену табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні показники оцінювання санітарного стану лісових насаджень

Група показників	Основні індикатори	Коротка характеристика використання
Життєвий стан дерев	Частка дерев за категоріями I–VI, %; індекс санітарного стану I_c	Базовий критерій; використовується для порівняння насаджень різного віку та типу лісу [2; 3]
Фітопатологічні показники	Наявність і площа осередків шкідників та хвороб; ступінь пошкодження крон і стовбурів	Дозволяють локалізувати осередки небезпечних агентів і встановити причини ослаблення [5; 7]
Структурні показники	Повнота, ярусність, видовий склад, розподіл за діаметрами й висотами	Відображають структурну стійкість та здатність насаджень протистояти чинникам пошкодження [3; 6]
Обсяги сухоостою та відмерлої деревини	Об'єм сухоостою, $m^3/га$; частка дерев V–VI категорій, %	Характеризують ступінь деградації деревостану та потенційний ризик розвитку шкідників і пожеж
Ознаки антропогенного впливу	Захаращеність, наявність колій, пошкодження кореневих ший, сліди незаконних рубок	Вказують на роль господарської діяльності та рекреаційного навантаження в погіршенні санітарного стану [2; 8]

У подальших розділах саме ці групи показників будуть використані як основні лісівничі індикатори під час аналізу санітарного стану лісів НПП «Цуманська пуша» за матеріалами наземних таксацій і супутникових спостережень [1].

Санітарний стан лісу формується під дією комплексу абіотичних, біотичних та антропогенних чинників, які нерідко взаємодіють між собою.

До абіотичних чинників належать тривалі посухи, екстремальні температури, пізні весняні та ранні осінні заморозки, сильні вітри, сніговали та вітровали, льодяні дощі, підтоплення тощо. У дослідженнях

середземноморських дубових лісів доведено, що повторювані періоди літньої посухи призводять до комплексного синдрому ослаблення: дефоліації, усихання верхівок, розвитку некрозів кори й корневих гнилей [9] (рис. 1.1). Подібні процеси спостерігаються й у соснових та дубових насадженнях Полісся, де зміни клімату викликають поєднання ґрунтової посухи й високих температур, що сприяє масовому всиханню дерев у пониженнях рельєфу та на легких піщаних ґрунтах [5; 6].



Рисунок 1.1 – Симптоми ослаблення та всихання дубових насаджень у посушливих умовах: а – наявність сухостою; б – буре забарвлення крон і підвищення їх прозорості (дефоліація); в – відшарування кори; г, д – пошкодження стовбурів, спричинені патогенними агентами, зокрема грибами *Fomes fomentarius* та *Huroxylon mediterraneum*.

Найважливішими біотичними агентами погіршення санітарного стану є стовбурові та листогризучі комахи, мікроміцети, бактеріальні хвороби, а також пошкодження дикими тваринами. В аналітичній довідці про фітосанітарний стан соснових лісів Західного Полісся зазначено, що комплекс корневих гнилей і стовбурових шкідників (короїди, лубоїди) є однією з головних причин великомасштабного всихання соснових насаджень [5]. Масове відмирання дерев у насадженнях, ушкоджених стовбуровими шкідниками, добре ілюструється на рис. 1.2, де показано суцільні плями всихання пологів хвойних насаджень на

аерофотознімку. Дослідження поширеності інфекційних хвороб у лісах Житомирського Полісся підтверджують, що інтенсивність прояву кореневої губки, ракових хвороб кори й некрозів суттєво корелює з категоріями санітарного стану та показниками структури деревостанів [10].



Рисунок 1.2 – Плями масового всихання хвойних насаджень на аерофотознімку

До антропогенних факторів, що погіршують санітарний стан, належать: нерациональні рубки (надмірне виснаження насаджень, залишення значних обсягів порубкових решток); порушення режиму лісокористування на заповідних територіях; забруднення повітря та ґрунтів промисловими викидами; рекреаційне навантаження, спричинене витопами підстилки, пошкодженням корневих систем, засміченням території; лісові пожежі, у тому числі низові, що не завжди фіксуються як пожежні надзвичайні ситуації, але призводять до ослаблення дерев.

У роботах з оцінювання санітарного стану соснових насаджень Полісся наголошується, що своєчасне проведення рубок догляду та інших лісогосподарських заходів сприяє формуванню більш стійких деревостанів, у яких частка здорових дерев та індекс санітарного стану істотно кращі, ніж у насадженнях без належного догляду [3].

Санітарний стан лісів є зручним об'єктом для комплексних досліджень, оскільки поєднує біологічні, лісівничі, фітопатологічні та екологічні аспекти. Традиційні наземні методи діагностики дають можливість детально описати

структуру насаджень і характер пошкоджень, але є трудомісткими та обмеженими за площею охоплення.

У світовій практиці все ширше використовують дані дистанційного зондування Землі, які дозволяють інтерпретувати ознаки ослаблення, всихання й відмирання лісів за зміною спектральних характеристик крон, індексів рослинності, просторової структури пологів тощо [3; 4; 11]. В роботі [11] показано, що саме індикатори, пов'язані із санітарним станом (дефоліація, зміна кольору та щільності крони, обсяги сухостою), є одними з найбільш перспективних для інтерпретації за супутниковими та аерофотоданими [3; 4]. Приклад використання супутникових зображень для виявлення плям всихання та зниження щільності пологів наведено на рис. 1.3, де фрагмент супутникового знімка поєднується з вегетаційним індексом для виділення ослаблених ділянок.

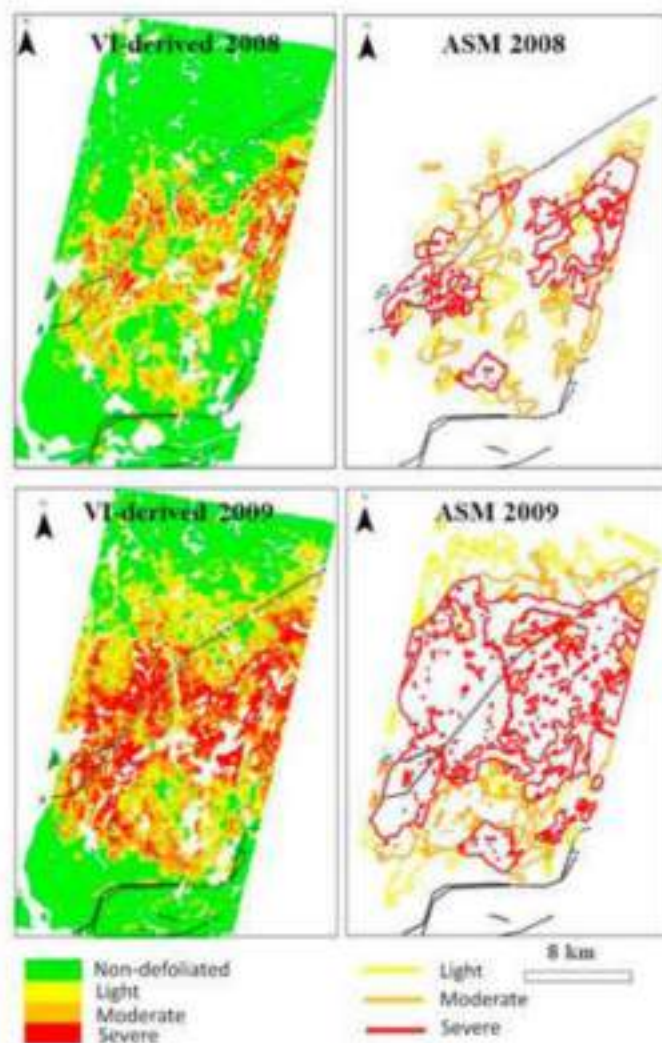


Рисунок 1.3 – Приклад картографування ступеня дефоліації хвойних лісів за супутниковими вегетаційними індексами (NDVI, NDMI, EVI)

Для НПП «Цуманська пуща», де лісові екосистеми виконують не лише лісогосподарські, а й важливі природоохоронні та рекреаційні функції, санітарний стан виступає базовим критерієм оцінювання стійкості та екологічної цінності деревостанів. Саме тому подальші розділи кваліфікаційної роботи будуть присвячені аналізу санітарного стану лісів парку за даними наземних обстежень та супутникових знімків, а також розробленню методичних підходів до його моніторингу [1].

1.2. Класичні підходи до санітарної оцінки деревостанів

У лісівництві розрізняють два близькі, але не тотожні поняття – життєвий стан дерева та санітарний стан деревостану. Життєвий стан окремого дерева характеризує його здатність підтримувати нормальні ростові процеси та протистояти дії стресових чинників (посухи, шкідники, хвороби, забруднення тощо), що оцінюється за морфологічними й частково фізіологічними ознаками крони, стовбура й приросту [8; 12].

Санітарний стан деревостану розглядають як узагальнену характеристику життєвого стану сукупності дерев на ділянці, з урахуванням поширеності та інтенсивності ушкоджень. Відповідно до «Санітарних правил в лісах України» підставою для призначення санітарно-оздоровчих заходів є результати лісопатологічного обстеження, під час якого визначають причини ослаблення дерев, обсяг сухостою та дерев, що всихають, а також динаміку цих показників [2].

Для забезпечення порівнюваності даних у просторі та часі в Україні застосовують уніфіковані шкали оцінювання життєвого стану дерев і деревостанів та кількісні показники, серед яких центральне місце займає індекс санітарного стану деревостану (I_c) [3; 8; 12]. Цей показник поєднує інформацію про розподіл дерев за категоріями життєвого стану й дозволяє перейти від описової оцінки до кількісної, придатної для математико-статистичного аналізу.

Оцінювання життєвості окремих дерев здійснюють, як правило, за шестибальною шкалою, адаптованою до українських умов на основі класичних

лісопатологічних напрацювань та сучасних методичних рекомендацій [8; 12].

На практиці оцінку життєвого стану проводять на кругових або прямокутних пробних площах, де для кожного дерева вибірки визначають категорію за наведеною шкалою [3; 8]. Подальший аналіз структури деревостану за категоріями життєвості дає змогу виявляти осередки ослаблених насаджень, оцінювати їхню динаміку та прогнозувати ризики масового всихання.

Схему взаємозв'язку між категоріями життєвого стану окремих дерев, сукупною санітарною оцінкою деревостанів та рекомендованими лісогосподарськими заходами відображено на рис. 1.1.

На основі розподілу дерев за категоріями життєвого стану та з урахуванням причин їхнього ослаблення виділяють санітарні класи деревостанів. У чинних Санітарних правилах, методичних рекомендаціях УкрНДІЛГА та сучасних дослідженнях зазвичай розрізняють такі групи насаджень: здорові, ослаблені, сильно ослаблені, такі, що всихають, і загиблі [2; 3; 8; 12].

Класифікація деревостанів поєднує два рівні інформації:

1. індивідуальний стан дерев (категорії I–VI),
2. частку дерев кожної категорії в загальній кількості дерев на площі.

Так, деревостан відносять до ослаблених, коли основна маса дерев належить до I–II категорій, але зростає частка III категорії й поодинокі дерева IV–V категорій; сильно ослаблені насадження характеризуються домінуванням дерев III–IV категорій; насадження, що всихають, – значною часткою дерев IV–V категорій та осередками плямистого чи суцільного всихання; загиблі насадження формуються, коли переважають дерева V–VI категорій [3; 12; 13].

Орієнтовні діапазони значень узагальнювальних показників життєвості та санітарного стану насаджень, які застосовують у дослідженнях Полісся, зведено в табл. 1.2 [3; 12; 13].

У подальших розділах кваліфікаційної роботи межі класів санітарного стану за I_c (табл. 1.2) будуть використані як еталонні наземні показники для зіставлення з супутниковими індексами NDVI лісів НПП «Думанська пуща».

Таблиця 1.2 – Орієнтовні діапазони санітарного стану I_c деревостанів і відповідні класи санітарного стану

Діапазон значень	Інтерпретація стану насадження
1,0–1,5	Здорові насадження
1,51–2,5	Ослаблені насадження
2,51–3,5	Сильно ослаблені насадження
3,51–4,5	Насадження, що всихають
>4,5	Загиблі насадження

Індекс санітарного стану деревостану (I_c) дає змогу звести інформацію про розподіл дерев за категоріями життєвості до одного числового показника, що полегшує порівняння різних ділянок, аналіз динаміки та побудову статистичних моделей [3; 12].

У класичному варіанті індекс I_c обчислюють за формулою:

$$I_c = \frac{(k_1 \cdot n_1 + k_2 \cdot n_2 + \dots + k_6 \cdot n_6)}{N}, \quad (1.1)$$

де I_c – індекс стану; $k_1 \dots k_6$ – категорія стану (від I до VI), N – загальна кількість дерев на пробній площі; $n_1 \dots n_6$ – кількість дерев відповідної категорії стану [3; 12].

Чим вища частка ослаблених і сухостійних дерев, тим більшим буде значення I_c і тим гіршим вважається санітарний стан деревостану. Межі інтервалів I_c , що відповідають окремим класам санітарного стану, наведено в табл. 1.2.

У деяких роботах (особливо на заповідних територіях або там, де сухостій V–VI категорій уже вилучений) застосовують модифікований варіант індексу з урахуванням лише дерев I–IV категорій:

$$I_c = \frac{k_1 \cdot n_1 + k_2 \cdot n_2 + k_3 \cdot n_3 + k_4 \cdot n_4}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4}. \quad (1.2)$$

При цьому межі класів санітарного стану перераховують так, щоб зберегти логіку градації «здорові – ослаблені – сильно ослаблені – такі, що всихають» [12].

Переваги використання I_c полягають у тому, що він узагальнює структуру

деревостану за життєвістю, враховуючи не лише наявність ослаблених дерев, але й їхню частку; сумісний із традиційною категоріальною оцінкою, оскільки базується на ній; придатний для статистичного аналізу, зокрема побудови регресійних залежностей між санітарним станом і ґрунтово-кліматичними чинниками, таксаційними показниками або супутниковими індексами [3; 4; 12].

Індекс санітарного стану I_C широко застосовують у дослідженнях соснових насаджень Українського Полісся, де проблема всихання набула особливої гостроти. У роботі В. Мельник показано, що в соснових деревостанах зони безумовного відселення частка ослаблених і сухостійних дерев значно перевищує фонові значення, а середні значення I_C відповідають класам «сильно ослаблені» та «такі, що всихають» насаджень [3]. Подібні результати отримано й для низки лісових масивів Західного Полісся та зелених зон великих міст [5; 6; 13].

У природоохоронних територіях, таких як заказники й національні парки, I_C використовують переважно для моніторингу довгострокових змін санітарного стану та оцінювання ефективності режимів охорони. Наприклад, у роботі [12], досліджуючи лісовий заказник «Грушеватський», автори поєднали аналіз I_C та індексу життєвості L_w і показали, що найгірший стан мають насадження на екологічно вразливих ділянках з високим рекреаційним навантаженням [12]. В іншому дослідженні для соснових насаджень Полісся Житомирщини на основі значень I_C обґрунтовано потребу у вибіркових санітарних рубках, їхній рекомендований обсяг і просторовий розподіл по лісництвах [13].

У цій магістерській роботі індекс I_C використаний, по-перше, як базовий наземний показник санітарного стану соснових насаджень НПП «Цуманська пуца», а по-друге – як калібрувальний параметр для встановлення зв'язків між класами санітарного стану та вегетаційними індексами, отриманими з супутникових знімків.

1.3. Сучасний стан використання дистанційного зондування Землі в оцінці санітарного стану лісів

Упродовж останніх десятиліть дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) стало одним із ключових інструментів моніторингу стану лісових екосистем і важливим доповненням наземних мереж спостережень, зокрема програми ICP Forests у Європі [14; 19]. Оглядові роботи показують, що саме оцінка санітарного стану (дефоліація, зміна забарвлення крон, всихання, пошкодження шкідниками та хворобами) є однією з найдинамічніших сфер застосування оптичних супутникових даних [14; 20].

Фізичною основою такого підходу є те, що ослаблені та хворі дерева змінюють вміст хлорофілу та води в листках/хвої, а також просторову структуру крони. Це відбивається на спектральних характеристиках лісового покриву – насамперед у червоному, ближньому інфрачервоному та короткохвильовому інфрачервоному діапазонах – і проявляється у зниженні значень вегетаційних індексів (NDVI, EVI, індексів на основі red-edge-каналів) та індексів вологості (NDMI, NBR тощо) [14; 18; 20]. Саме ці спектральні ознаки використовують як непрямі показники санітарного стану деревостанів.

Сучасні дослідження виділяють кілька «рівнів» ДЗЗ, які доповнюють один одного за просторовою роздільною здатністю, періодичністю та вартістю [14; 19] (рис. 1.4):

1. Безпілотні літальні апарати й аерофотознімання із сантиметрово–дециметровою роздільною здатністю дають змогу аналізувати окремі крони, оцінювати ступінь дефоліації на рівні дерева, виявляти сухостій і вітровал. Такі дані незамінні на дослідних ділянках, але економічно складні для систематичного моніторингу великих площ [14].

2. Комерційні супутникові системи високої роздільної здатності (WorldView-2/3, GeoEye, PlanetScope; 0,3–3 м) дозволяють деталізувати структуру пологів й у багатьох випадках оцінювати стан окремих дерев або невеликих груп, але характерні обмеженою доступністю архіву та високою вартістю знімків [14; 15].

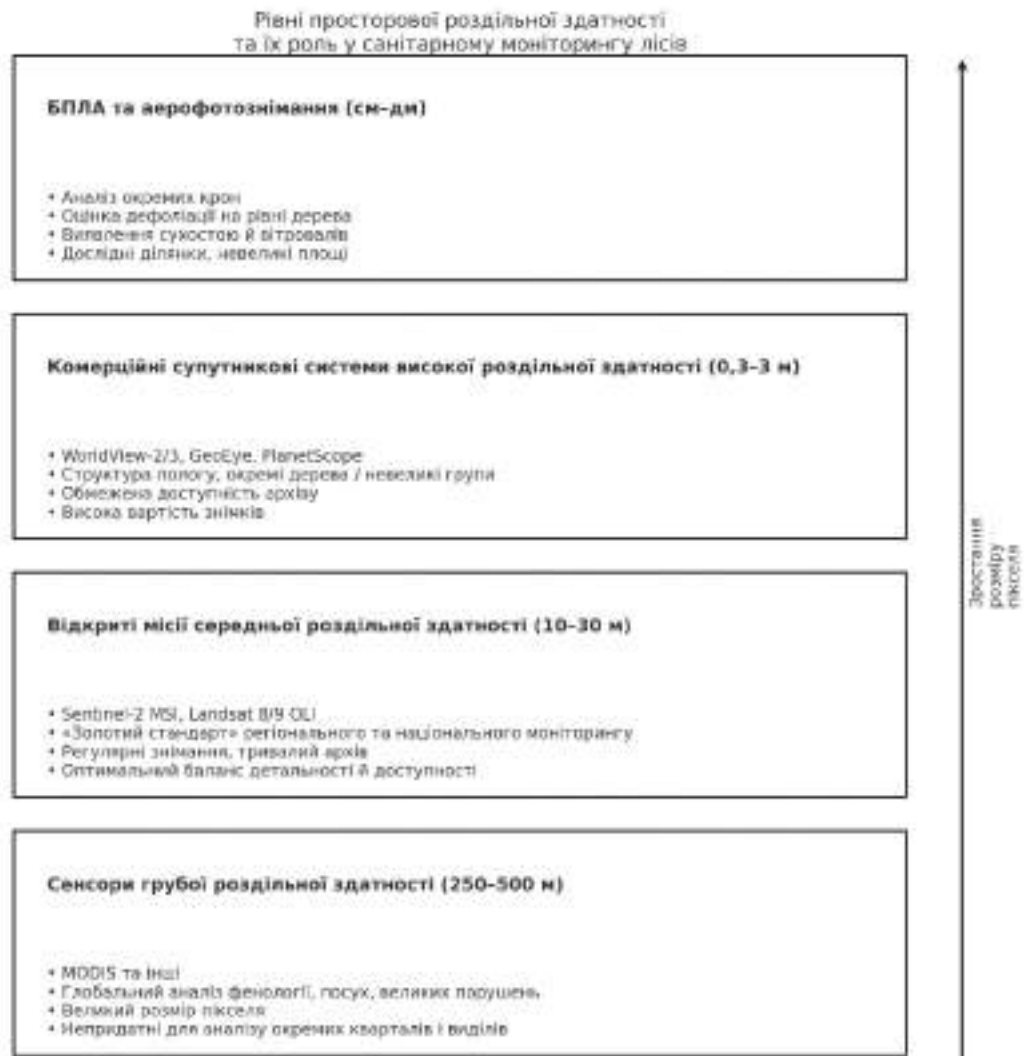


Рисунок 1.4 – Рівні просторової роздільної здатності та їх роль у санітарному моніторингу лісів

3. Відкриті місії середньої роздільної здатності – насамперед Sentinel-2 MSI (10–20 м, 13 спектральних каналів) і Landsat 8/9 OLI (30 м, 11 каналів) – розглядаються як «золотий стандарт» для регіонального й національного моніторингу, оскільки поєднують достатню деталізацію з регулярністю знімань та багаторічним архівом [16; 19; 20].

4. Сенсори грубої роздільної здатності (MODIS та ін.) застосовують переважно для глобального аналізу фенології, посух і великих порушень, але їх пікселі (250–500 м) занадто великі для аналізу окремих кварталів і виділів [14; 19].

Узагальнену характеристику найбільш актуальних супутникових платформ, придатних для оцінювання санітарного стану лісів у регіоні досліджень, наведено в табл. 1.3.

Як видно з табл. 1.3, для задач оцінки санітарного стану лісів НПП

«Цуманська пуща» найбільш збалансованим є використання безкоштовних даних Sentinel-2 та Landsat 8/9, які забезпечують прийнятну просторову роздільну здатність на рівні виділів (10–30 м) та достатню частоту повторних знімків для аналізу сезонної й багаторічної динаміки [16; 19; 20].

Таблиця 1.3 – Основні супутникові платформи для моніторингу санітарного стану лісів

Супутникова місія	Просторова роздільна здатність, м	Період повторюваності	Спектральні канали (основні)	Особливості для оцінки санітарного стану
Sentinel-2 MSI	10, 20, 60	~5 днів (S2A/B)	13 каналів (видимий, NIR, три red-edge, SWIR)	Наявність red-edge-каналів підвищує чутливість до змін хлорофілу та помірного ослаблення лісів; безкоштовний глобальний архів із 2015 р. [16; 20].
Landsat 8/9 OLI	15 (панхр.), 30 (мультиспектр.), 100 (TIR)	8 днів (дві платформи)	11 каналів (видимий, NIR, SWIR, TIR)	Довготривала серія Landsat (з 1980-х років) дає змогу аналізувати багаторічну динаміку стану лісів і виділяти повільні процеси деградації [19; 20].
MODIS (Terra/Aqua)	250–1000	1–2 дні	36 каналів	Використовується для виявлення великих за площею порушень (масові всихання, пожежі, посухи), але непридатний для аналізу окремих виділів [14; 19].
PlanetScope	~3	1 день	4–8 каналів	Забезпечує високу деталізацію для невеликих лісових масивів, але потребує платного доступу до повного архіву [14].
WorldView-2/3	0,3–2	1–4 дні	8–16 каналів	Дозволяє аналізувати окремі крони та детальні ушкодження, однак висока вартість обмежує використання для довготривалого моніторингу [14; 15].

Перші систематичні роботи, присвячені виявленню осередків пошкодження лісів шкідниками та хворобами, базувалися переважно на даних серії Landsat. Так, P. Rahimzadeh-Bajgiran зі співавторами, використовуючи багаторічні знімки Landsat, розробили підхід до щорічного виявлення та класифікації за ступенем дефоліації осередків шовкопряда ялинового (*spruce budworm*) у хвойних лісах Північної Америки [15]. Класифікація ступеня пошкодження базувалася на зміні NDVI та інших спектральних показників між «до-» та «після-» періодами

дефоліації, що наочно демонструє можливості ДЗЗ для виявлення саме санітарних осередків.

Аналогічно, канадські дослідження з використанням супутникових та аерофотознімків показують можливість картування площ, пошкоджених шовкопрядом, із подальшою інтерпретацією ступеня дефоліації [15]. Приклад фрагмента супутникового знімка з виділеними осередками ослаблених хвойних насаджень за вегетаційним індексом наведено на рис. 1.3, де світліші відтінки відповідають зниженим значенням NDVI і, відповідно, вищому рівню дефоліації [15].

Новий етап розвитку методів оцінки санітарного стану лісів пов'язують із широким упровадженням Sentinel-2. На мережі ділянок ICP Forests у країнах ЄС показано, що поєднання red-edge-каналів Sentinel-2 із класичними індексами NDVI та NDMI дозволяє надійно оцінювати дефоліацію та знебарвлення крон на рівні окремих пробних площ [16]. Зокрема, дослідження Т. Molnár та співавторів в Угорщині засвідчило, що супутникові показники Sentinel-2 добре узгоджуються з польовими оцінками дефоліації на ділянках рівнів I та II мережі ICP Forests, що відкриває можливість оперативного розширення наземних спостережень за рахунок супутникових даних [16].

У комплексному огляді J. Drechsel і M. Forkel підкреслено, що найбільш часто для оцінки санітарного стану лісів застосовуються індекси NDVI, EVI, індекси на основі red-edge-каналів (RENDVI, NDRE), а також індекси вологості (NDMI, NBR та ін.), які аналізують у вигляді часових рядів і поєднують із методами машинного навчання [14]. Саме такий підхід – поєднання наземних показників санітарного стану з часовими рядами вегетаційних індексів Sentinel-2 та Landsat використано і в цій магістерській роботі.

Окремий напрям – застосування довгих часових рядів Landsat для аналізу багаторічної динаміки лісових екосистем. Огляд А. Vanskota зі співавторами показав, що Landsat-серії дозволяють виокремлювати як раптові порушення (пожежі, вітровали, масові всихання), так і повільні процеси деградації, пов'язані з кліматичним стресом або хронічним пошкодженням шкідниками [19]. Наразі

ці ряди часто гармонізують із Sentinel-2 (схема Harmonized Landsat–Sentinel, HLS), що забезпечує ще вищу частоту спостережень і підвищує чутливість до змін стану лісів [20].

В Україні останніми роками сформувався окремий напрям застосування ДЗЗ у лісовому господарстві. У роботі [17] запропоновано національну рамку оцінки лісових ресурсів України, яка поєднує дані Sentinel-2, Landsat та інші супутникові джерела з наземними таксаційними матеріалами для оцінки запасу, порідного складу, повноти та окремих структурних показників по всій території країни, включно з регіонами, що зазнали впливу воєнних дій. Окремі кейси в межах цієї рамки демонструють успішне використання Sentinel-2 для картування структурних параметрів деревостанів і виділення порушених ділянок.

Хоча більшість українських робіт поки що зосереджені на картуванні лісового покриву, змін площ і типів лісу, поступово з'являються дослідження, безпосередньо орієнтовані на оцінку стану насаджень. Показовим є дослідження [18], у якому для території м. Києва проаналізовано просторовий розподіл і взаємозв'язок між NDVI та індексом вологості NDMI, розрахованими за даними Sentinel-2 за 2017–2021 рр.. Автори встановили статистично значущий зв'язок між цими індексами, що підтверджує їх придатність для оцінки життєвого стану деревної рослинності в умовах помірного клімату України.

У низці українських робіт, присвячених моніторингу змін площі та стану лісового покриву в карпатському та поліському регіонах, показано застосування часових рядів Landsat та Sentinel-2 для виявлення осередків всихання, пов'язаних із кореневою губкою, короїдом та іншими шкідниками [17; 18; 19]. Це створює методичне підґрунтя для адаптації подібних підходів до умов НПП «Думанська пуша».

Отже, на міжнародному рівні ДЗЗ вже є невід'ємною складовою систем оцінювання санітарного стану лісів і тісно інтегроване з наземними мережами спостережень типу ICP Forests [14; 16]. Для задач, подібних до оцінки санітарного стану лісів НПП «Думанська пуша», найбільш перспективними є безкоштовні дані Sentinel-2 та Landsat 8/9, які забезпечують оптимальне

поєднання просторової роздільної здатності, частоти спостережень і тривалості архіву [16; 19; 20]. В Україні вже напрацьовано рамковий підхід до поєднання супутникових даних із наземними лісовпорядкувальними матеріалами [17], а результати досліджень у м. Києві та інших регіонах показують придатність індексів NDVI, NDMI та їх комбінацій для оцінки стану деревної рослинності [18]. У подальших розділах роботи ці напрацювання адаптовані до умов НПП «Думанська пуща» шляхом поєднання санітарної таксації пробних площ (індекс I_C та розподіл дерев за категоріями життєвого стану) з аналізом супутникових даних Sentinel-2 і Landsat у ГІС-середовищі.

1.4. Наземні та супутникові індикатори санітарного стану лісів

Комплексна оцінка санітарного стану лісів неможлива без поєднання наземних таксаційних показників і спектральних індексів, отриманих із супутникових знімків. Наземні показники відображають реальні ушкодження дерев (усихання, дефоліація, наявність шкідників, обсяг сухостою), тоді як супутникові індекси фіксують інтегральну реакцію деревостану на стрес через зміну відбиття в різних діапазонах спектра (пігментний стан крон, запас хвої, вологість, ступінь пошкодження крони тощо) [3; 12; 13; 21].

До базових наземних індикаторів санітарного стану відносять: частку дерев за категоріями життєвості, індекс санітарного стану (I_C), ступінь, запас сухостою й фаутичних дерев, а також наявність та інтенсивність прояву біотичних і абіотичних ушкоджень [3; 8; 12; 13]. Ці показники формують основу лісівничої інтерпретації ситуації в деревостані й безпосередньо пов'язані з обґрунтуванням санітарно-оздоровчих заходів.

У попередніх підрозділах розглянуто категорії життєвого стану дерев, індекс I_C та класи санітарного стану деревостанів. Узагальнюючи, основні наземні індикатори, які доцільно використовувати при оцінці соснових насаджень НПП «Думанська пуща», можна подати у вигляді табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Основні спектральні індекси для оцінки санітарного стану лісів

Індекс	Формула (для Sentinel-2)	Основна чутливість	Типове застосування
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$(B8 - B4) / (B8 + B4)$	Загальний «зелений» стан рослинності, листостійність, запас хвої	Оцінка просторового розподілу продуктивності й життєвості деревостанів, виявлення великих осередків ослаблення [21; 23]
NDMI (Normalized Difference Moisture Index)	$(B8 - B11) / (B8 + B11)$	Вміст вологи в кронах, чутливість до посухи й дефоліації	Виявлення ділянок зниження вологості й висихання крон, моніторинг посух та їх наслідків для лісу [19; 22]
NBR (Normalized Burn Ratio)	$(B8 - B12) / (B8 + B12)$	Пошкодження крон внаслідок пожеж, сильних стресів	Оцінка ступеня пошкодження лісу пожежами, виявлення осередків сильного усихання й відмирання хвої
NDRE (Normalized Difference Red-Edge Index)	$(B8 - B5) / (B8 + B5)$	Вміст хлорофілу, ранні зміни пігментного стану крони	Раннє виявлення фізіологічного стресу, який ще не проявився як дефоліація, особливо перспективний для хвойних [23; 24]
EVI (Enhanced Vegetation Index)	$2,5 \cdot (B8 - B4) / (B8 + 6 \cdot B4 - 7,5 \cdot B2 + 1)$	Структура рослинного покриву, зменшений вплив атмосферних ефектів і ґрунту	Деталізація змін структури крон, уточнення результатів, отриманих за NDVI у густих насадженнях [22]

У контексті НПП «Цуманська пуща» наземні індикатори особливо важливі для калібрування супутникових даних, оскільки саме вони дозволяють пов'язати значення спектральних індексів із реальним станом крон сосни звичайної, ступенем дефоліації та наявністю осередків усихання.

Спектральні індекси, розраховані з багатозональних супутникових знімків (Landsat, Sentinel-2 тощо), є ключовим інструментом дистанційної оцінки життєвості й ушкодженості лісів. Найбільш широко застосовується нормалізований різницевий вегетаційний індекс NDVI, який відображає співвідношення відбиття в ближньому інфрачервоному (*NIR*) і червоному (*RED*) діапазонах:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (1.3)$$

Значення NDVI змінюється в інтервалі від -1 до +1; низькі значення (близькі до нуля або від'ємні) відповідають водним поверхням, голому ґрунту й урбанізованим територіям, тоді як високі (0,6–0,8 і більше) характерні для густих, здорових деревостанів із розвинуеною кроною [21; 22].

Однак NDVI має низку обмежень: він насичується при високій

листочкості (LAI), мало відрізняє густі здорові крони від помірно ослаблених, чутливий до впливу ґрунтового фону й атмосферних умов [21; 24]. Тому в сучасних дослідженнях санітарного стану лісів NDVI зазвичай застосовують у поєднанні з іншими індексами, зокрема такими, що характеризують вологість рослинної маси (NDMI), пошкодження крон (NBR, індекси постпожежних змін), а також індексами на основі red-edge-діапазону (NDRE, REIP тощо) [19; 22–24].

У табл. 1.4 подано узагальнення найбільш уживаних спектральних індексів, перспективних для оцінки санітарного стану соснових насаджень НПП «Думанська пуша».

Таблиця 1.4 – Основні спектральні індекси для оцінки санітарного стану лісів

Індекс	Формула (для Sentinel-2)	Основна чутливість	Типове застосування
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$(B8 - B4) / (B8 + B4)$	Загальний «зелений» стан рослинності, листочкості, запас хвої	Оцінка просторового розподілу продуктивності й життєвості деревостанів, виявлення великих осередків ослаблення [21; 23]
NDMI (Normalized Difference Moisture Index)	$(B8 - B11) / (B8 + B11)$	Вміст вологи в кронах, чутливість до посухи й дефоліації	Виявлення ділянок зниження вологості й висихання крон, моніторинг посух та їх наслідків для лісу [19; 22]
NBR (Normalized Burn Ratio)	$(B8 - B12) / (B8 + B12)$	Пошкодження крон внаслідок пожеж, сильних стресів	Оцінка ступеня пошкодження лісу пожежами, виявлення осередків сильного усихання й відмирання хвої
NDRE (Normalized Difference Red-Edge Index)	$(B8 - B5) / (B8 + B5)$	Вміст хлорофілу, ранні зміни пігментного стану крони	Раннє виявлення фізіологічного стресу, який ще не проявився як дефоліація, особливо перспективний для хвойних [23; 24]
EVI (Enhanced Vegetation Index)	$2,5 \cdot (B8 - B4) / (B8 + 6 \cdot B4 - 7,5 \cdot B2 + 1)$	Структура рослинного покриву, зменшений вплив атмосферних ефектів і ґрунту	Деталізація змін структури крон, уточнення результатів, отриманих за NDVI у густих насадженнях [22]

За результатами сучасних досліджень, поєднання NDVI, NDMI та EVI дозволяє з високою точністю класифікувати рівні дефоліації лісів [22]. У хвойних насадженнях, де запас листя або хвої й пігментний стан крон сильно залежать від водного режиму, NDMI і споріднені індекси, що залучають короткохвильовий інфрачервоний (SWIR) діапазон, виявляються особливо інформативними для раннього виявлення зон посушливого стресу й прогресуючого всихання.

Окрему групу становлять індекси, що використовують red-edge-діапазон (Sentinel-2 B5, B6, B7). Дослідження, виконані на хвойних деревостанах показали, що індекс NDRE дозволяє виявляти ознаки стресу на 10–15 днів раніше, ніж NDVI, завдяки високій чутливості red-edge до змін вмісту хлорофілу [24]. Це відкриває можливості для своєчасного виявлення осередків ослаблення соснових насаджень Полісся задовго до того, як дефоліація стане візуально помітною.

Для коректної інтерпретації супутникових індексів у задачах санітарної оцінки лісів необхідно ув'язати їх із наземними індикаторами, насамперед із індексом ІС та часткою дерев за категоріями життєвості. Схематично такий взаємозв'язок можна подати у вигляді концептуальної схеми (рис. 1.5).

Концептуальна схема інтеграції наземних та супутникових індикаторів санітарного стану лісів

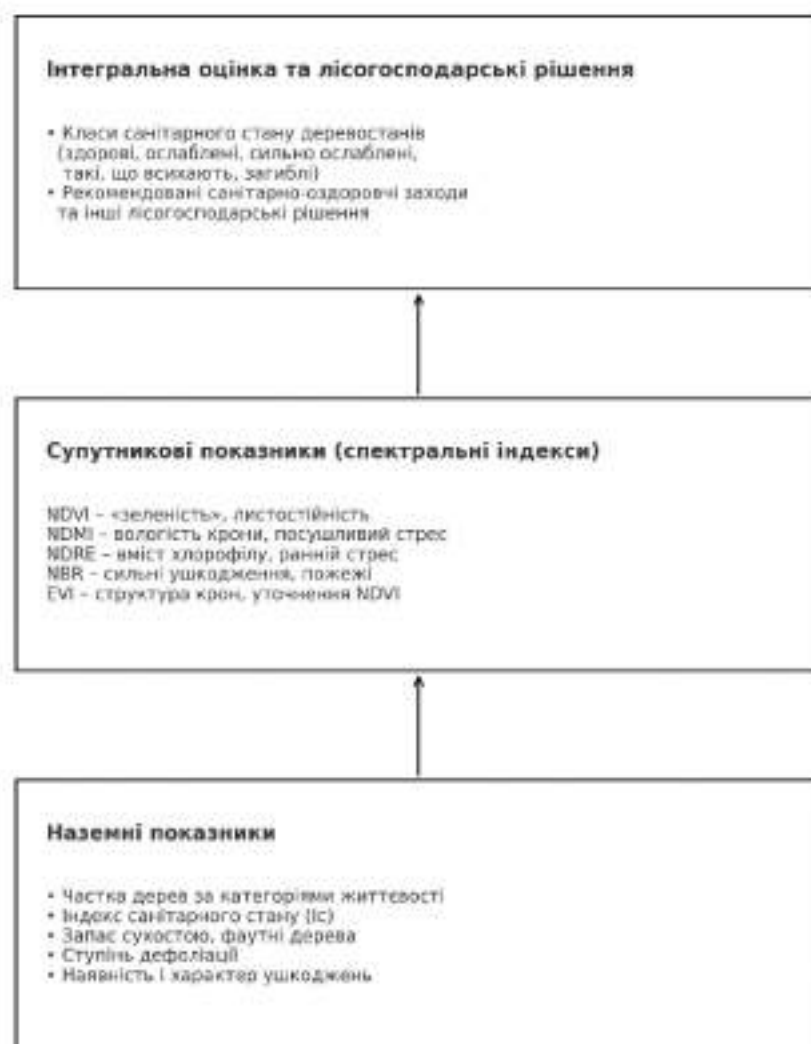


Рисунок 1.5 – Концептуальна схема інтеграції наземних та супутникових індикаторів санітарного стану лісів

У такій схемі наземні дані фактично виступають еталоном для навчання й перевірки моделей, що перетворюють значення супутникових індексів на прогнозні оцінки I_C та класів санітарного стану.

Проведені в Європі й Північній Америці дослідження підтверджують, що саме комбінація наземних таксаційних даних з часовими рядами Sentinel-2 або Landsat дає змогу створювати надійні моделі для моніторингу здоров'я лісів, включаючи виявлення дефоліації, посухи та інтенсивних осередків біотичних ушкоджень [19; 22; 23].

РОЗДІЛ 2

ПРОГРАМА, МЕТОДИКА ТА ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Загальна програма досліджень та схема оцінки санітарного стану лісів НПП «Цуманська пуща»

Програма досліджень у кваліфікаційній роботі ґрунтується на інтеграції вже наявних в літературі результатів санітарних обстежень, виконаних для лісів Ківерцівського національного природного парку «Цуманська пуща», із даними супутникового дистанційного зондування Землі.

У роботі не передбачається проведення нових наземних санітарних обстежень; натомість використано опубліковані матеріали щодо санітарного стану деревостанів парку, отримані на основі детальних лісопатологічних обстежень постійних пробних площ [25; 26].

Методична основа програми спирається на підходи, викладені у статті [1] магістранта В. Гриневича (оцінка санітарного стану насаджень із використанням індексу I_c та супутникових вегетаційних індексів), а також на результати досліджень Г. В. Герасимчук та В. Г. Мазепи, де розраховано індекс санітарного стану дубових деревостанів НПП «Цуманська пуща» й охарактеризовано структуру ушкоджень [1; 25; 26].

Виходячи з поставленої мети – оцінити санітарний стан лісів НПП «Цуманська пуща» із застосуванням супутникових засобів дистанційного зондування Землі – загальна програма досліджень включає такі етапи:

1. Аналіз лісовпорядних матеріалів НПП «Цуманська пуща» – вивчення структури лісового фонду, розподілу насаджень за породами, віком, повнотою, типами лісу, а також огляд наявних звітів щодо санітарного стану лісів парку.

2. Узагальнення та оцифрування результатів наявних санітарно-таксаційних обстежень – формування бази наземних показників (категорії життєвого стану дерев, індекс санітарного стану I_c , характер та інтенсивність ушкоджень), отриманих у ході детальних лісопатологічних обстежень постійних пробних площ дубових деревостанів НПП «Цуманська пуща» [25; 26].

3. Створення геоінформаційної бази даних – побудова полігонального шару кварталів і виділів лісів парку та прив'язка до нього узагальнених наземних показників санітарного стану для тих виділів, які містять постійні пробні площі або детально описані у публікаціях.

4. Відбір і попередня обробка супутникових знімків Sentinel-2 – вибір сцен за вегетаційний період (червень–серпень) з мінімальним хмарним покривом, атмосферна корекція (рівень Level-2A), маскування хмар та тіней, обрізання зображень за контуром парку.

5. Розрахунок вегетаційного індексу NDVI і зональна статистика – обчислення середніх (або медіанних) значень індексів у межах полігонів лісових виділів, що мають наземні оцінки I_c .

6. Статистичне моделювання зв'язків між наземними та супутниковими показниками – аналіз кореляцій між I_c , часткою дерев за категоріями життєвості й спектральними індексами.

7. Класифікація й картографування санітарного стану лісів НПП «Думанська пуща» – поширення встановлених залежностей на всі лісові виділи парку та аналіз просторового розподілу здорових, ослаблених і сильно ослаблених насаджень.

З урахуванням того, що блок наземних даних базується на уже виконаних дослідженнях, другий етап програми фактично зводиться до ретельної роботи з опублікованими матеріалами, а саме виокремлення з публікацій інформації із описами постійних пробних площ, категоріями життєвого стану дерев та розрахованими індексами I_c для [25; 26] та співставлення постійних пробних площ із конкретними кварталами й виділами лісового фонду парку, що дозволить інтегрувати їх у ГІС-базу.

Узагальнена програма досліджень із виділенням основних етапів подана в табл. 2.1 з урахуванням використання вже наявних наземних даних.

Таблиця 2.1 – Основні етапи програми досліджень санітарного стану лісів НПП «Цуманська пуша» із використанням наявних результатів санітарних обстежень

№ етапу	Зміст робіт	Вихідні дані	Очікувані результати
1	Аналіз лісовпорядних, і довідкових матеріалів НПП «Цуманська пуша»	Лісовпорядні матеріали, літопис природи Ківерцівського НПП «Цуманська пуша»	Характеристика лісового фонду, виділення ключових категорій насаджень і ділянок для детальної оцінки
2	Узагальнення результатів санітарних обстежень, опублікованих для дубових деревостанів парку	Статті В.Г. Мазепи та Г. В. Герасимчук і співавторів, що містять дані постійних пробних площ (категорії життєвого стану, I_c , структура ушкоджень) [25; 26]	База наземних санітарних показників (I_c , частка дерев за категоріями, опис ушкоджень) на рівні пробних площ / насаджень
3	Створення геобаз в середовищі ГІС та прив'язка наземних даних	Цифрові картосхеми парку, шар кварталів і виділів, база наземних даних	Полігональний шар виділів із атрибутами таксаційних та санітарних показників (де це можливо)
4	Вибір і попередня обробка супутникових знімків Sentinel-2 (Level-2A)	Архів знімків Sentinel-2 за вегетаційний період, контур парку	Підготовлений набір знімків без хмар і тіней, обрізаний за межами парку
5	Розрахунок вегетаційних індексів і зональна статистика	Мультиспектральні знімки Sentinel-2, шар виділів	Таблиця середніх/медіанних значень NDVI для виділів із відомими I_c
6	Статистичний аналіз зв'язків між наземними та супутниковими показниками	База наземних даних (I_c , категорії життєвості) та індексів NDVI тощо	Оцінка тісноти зв'язку, параметри моделей, порогові значення індексів для меж класів санітарного стану
7	Картографування санітарного стану лісів НПП «Цуманська пуша»	Моделі зв'язку I_c – вегетаційні індекси, геобаза ГІС	Тематичні карти санітарного стану лісів, виявлення осередків ослаблення й всихання насаджень

2.2. Об'єкт, предмет та інформаційна база

Об'єктом дослідження є лісові екосистеми Ківерцівського національного природного парку «Цуманська пуша», розташованого у межиріччі Стиру й Горині в південній частині Волинського Полісся. Парк створено Указом Президента України 2010 року з метою збереження цінних природних та історико-культурних комплексів; його площа становить близько 34,5 тис. га, до складу входять різновікові дубові, соснові, грабові деревостани, болотні та заплавні угруповання, низка заказників і пам'яток природи [29–31].

Предметом дослідження виступає санітарний стан лісових насаджень НПП «Цуманська пуща» та його відображення у системі наземних і супутникових показників. До предметної області належать: індекс санітарного стану деревостанів (I_c), розподіл дерев за категоріями життєвого стану, частка ослаблених, сильно ослаблених і таких, що всихають, дерев, основні типи ушкоджень, а також значення вегетаційного індексу NDVI, розраховане за даними Sentinel-2 у межах лісових виділів парку [1; 19–21; 25; 26].

Інформаційна база досліджень сформована як комплекс різномірних джерел, що доповнюють одне одного за масштабом, змістом і призначенням:

1. Лісовпорядні і матеріали НПП «Цуманська пуща» та лісогосподарських підприємств, які містять відомості про квартално-видільну сітку, склад, вік, повноту й бонітет деревостанів, типи лісорослинних умов.

2. Опубліковані результати наземних санітарних обстежень деревостанів НПП «Цуманська пуща», зокрема праці В.Г.Мазепи та Г. В. Герасимчук [25; 26].

3. «Літопис природи» Ківерцівського НПП «Цуманська пуща» (том 8, 2023) як офіційне видання парку, де систематизовано багаторічні спостереження за станом природних комплексів [29].

4. Офіційні та довідково-туристичні інтернет-ресурси про парк, де узагальнено інформацію про історію створення, площу, основні природні комплекси й рекреаційні можливості НПП «Цуманська пуща» [30; 31].

5. Супутникові дані Sentinel-2 (Level-2A), отримані через інфраструктуру Copernicus Data Space Ecosystem. Атмосферно кориговані мультиспектральні знімки за вегетаційний період (червень–серпень) із мінімальною хмарністю використовуються для розрахунку вегетаційних індексів, що чутливі до «зеленості» й структурного стану крон, вмісту пігментів, вологості фітомаси та наявності сильних пошкоджень [14; 19–21; 28].

6. Геопросторові довідкові дані та ГІС-ресурси, зокрема цифрові шари кварталів і виділів, що містить публічну інформацію про лісовий фонд Волинської області та динаміку рубок, пошкоджень і пожеж [27]. Ці дані

забезпечують просторову прив'язку наземних і супутникових показників, а також картографічну візуалізацію результатів.

7. Наукові публікації з методики дистанційної оцінки стану лісів, у яких описано підходи до використання Sentinel-2, Landsat та інших сенсорів для оцінки дефоліації, посушливого стресу, наслідків пожеж і хвороб у лісах помірної зони [1; 14; 19–24].

2.3. Методика досліджень

Методика дослідження санітарного стану лісів НПП «Цуманська пуща» базується на підходах, запропонованих у статті В. В. Гриневича щодо інтеграції наземних санітарних оцінок та даних дистанційного зондування Землі в середовищі ГІС [1].

Основні етапи методики такі:

1. Узагальнення наземних санітарно-таксаційних даних і формування індексу санітарного стану деревостанів.

2. Побудова геоінформаційної бази виділів парку з прив'язкою наземних показників.

3. Відбір та попередня обробка супутникових знімків Sentinel-2 (рівень L2A)

4. Розрахунок вегетаційного індексу NDVI та агрегування його значень до рівня виділів.

5. Статистичний аналіз взаємозв'язку між наземними показниками і NDVI та класифікація насаджень за класами санітарного стану/

6. ГІС-картографування санітарного стану лісів НПП «Цуманська пуща».

Наземні санітарні показники для насаджень парку (кількість дерев за категоріями життєвого стану, наявність пошкоджень, сухостою тощо) узагальнюються за матеріалами попередніх детальних обстежень [25; 26]. Для кожної пробної площі або виділу застосовується шестикатегорійна шкала життєвого стану дерев (I – здорові; II – ослаблені; III – сильно ослаблені; IV –

такі, що всихають; V – свіжий сухостій; VI – старий сухостій) відповідно до чинних методичних рекомендацій і санітарних правил [1; 10; 13–15].

Індекси санітарного стану деревостану I_C для чистих за породою насаджень визначають за формулою:

$$I_C = \frac{1 \cdot n_1 + 2 \cdot n_2 + 3 \cdot n_3 + 4 \cdot n_4 + 5 \cdot n_5 + 6 \cdot n_6}{N}, \quad (2.1)$$

де $n_1 \dots n_6$ – кількість дерев відповідної категорії стану; N – загальна кількість дерев.

Для змішаних насаджень I_C розраховують з урахуванням суми дерев різних порід, що належать до однієї категорії стану, за аналогічною формулою, агрегуючи $n_1 \dots n_6$ по всіх породах [1].

$$I_C = \frac{(k_1 \cdot (n_{a1} + n_{b1} + n_{c1} + \dots)) + k_2 \cdot (n_{a2} + n_{b2} + n_{c2} + \dots) + \dots + k_6 \cdot (n_{a6} + n_{b6} + n_{c6} + \dots)}{N}, \quad (2.2)$$

де n_{ai}, n_{bi}, n_{ci} – кількість дерев різних порід, що належать до i -тої категорії стану.

Розповсюдженість ушкоджень (хвороб, заселення ентомошкідниками тощо) у деревостані оцінюють за часткою пошкоджених дерев:

$$P = \frac{n}{N} 100\%, \quad (2.3)$$

де P – розповсюдженість, %; n – кількість уражених дерев; N – загальна кількість дерев, що обстежуються.

Отримані значення I_C інтерпретують за шкалою санітарного стану деревостанів (табл. 2.3), яка враховує зв'язок між індексом та відносним поточним радіальним приростом порівняно з контрольними (здоровими) насадженнями [1; 10].

Таблиця 2.3 – Шкала оцінки санітарного стану деревостанів за індексом I_C

Індекс стану	Поточний середній періодичний радіальний приріст від контролю, %	Санітарний стан
1.00–1.50	≈100	Здоровий
1.51–2.50	71–100	Ослаблений
2.51–3.50	40–70	Сильно ослаблений
3.51–4.50	<40	Всихаючий
4.51–6.00	0	Мертвий (сухостійні насадження)

На основі I_C кожен деревостан (виділ або пробна площа) відносять до одного з п'яти класів санітарного стану. У подальшому ці класи використовуються як цільові категорії при аналізі супутникових індексів і при побудові легенди тематичних карт.

Наземні дані (значення I_C , частка дерев за категоріями життєвого стану, таксаційні характеристики) зводять у єдину таблицю та приєднують до полігонального шару лісових виділів НПП «Цуманська пуща» в середовищі QGIS. Для кожного виділу формують атрибутивні поля: склад, вік, повнота, бонітет, категорія захисності, попередня оцінка санітарного стану, I_C . Така ГС-база є основою для інтеграції з супутниковими даними й подальшого просторового аналізу.

Для дистанційної характеристики стану насаджень використовуються мультиспектральні знімки Sentinel-2 MSI рівня оброблення Level-2A (поверхнева відбивна здатність), відібрані за період максимально розвиненої листової поверхні (червень–серпень) із хмарністю над територією парку не більше 10–20 % [5–8; 18–20]. Первинна обробка включає: маскуванню хмар і тіней за каналами якості; приведення спектральних каналів до єдиної просторової роздільної здатності (10 м); обрізання знімків за контуром НПП «Цуманська пуща»; радіометричне нормування.

Базовим показником вибрано нормалізований вегетаційний індекс NDVI, який обчислюють за класичною формулою (1.3)

Отримані показники для пробних площ і окремих виділів є «опорними» наземними даними для калібрування супутникових індексів і побудови карт санітарного стану.

На основі індексу I_C формуються класи санітарного стану насаджень (здорові, ослаблені, сильно ослаблені, всихаючі, мертві), які надалі використовувалися як тематичні категорії при класифікації супутникових зображень та формуванні легенди карт.

NDVI розглядається як інтегральний показник «зеленості» та фотосинтетично активної біомаси, чутливий до дефоліації, порушення цілісності пологу, водного стресу й деградації лісової рослинності. Для кожного пікселя в межах лісових площ НПП обчислюється NDVI, після чого в QGIS виконують зональну статистику – розрахунок середнього, медіанного та, за потреби, кватильних значень NDVI у межах кожного полігона виділу.

Наземні показники та супутникові індекси зводяться у спільну таблицю. На цій основі виконують аналіз кореляцій між I_C та NDVI (а також між NDVI і часткою дерев ослаблених категорій) та побудову регресійних моделей виду:

$$I_C = a + b \cdot NDVI + \varepsilon, \quad (2.4)$$

де a, b – параметри регресії, оцінені за методом найменших квадратів;

ε – випадкова похибка.

За результатами регресійного аналізу визначають порогові інтервали NDVI, які відповідають класам санітарного стану деревостанів, виділенням за індексом I_C . Це дозволяє екстраполювати наземні оцінки на всю територію лісового фонду парку, у тому числі на ділянки, де наземні обстеження не проводилися. На основі класифікованих растрів NDVI та ГІС-шару виділів формують серію тематичних карт санітарного стану лісів НПП «Цуманська пуща» з виділенням здорових, ослаблених, сильно ослаблених, таких, що всихають, і мертвих насаджень.

Запропонована методика забезпечує формалізований зв'язок між традиційними категоріями санітарного стану деревостанів та супутниковими індексами, що дає змогу отримати карти стану лісів і використовувати їх для планування санітарно-оздоровчих заходів та моніторингу динаміки насаджень НПП «Цуманська пуща».

РОЗДІЛ 3

ПРИРОДНІ УМОВИ, ЛІСОВИЙ ФОНД ТА ЛІСОГОСПОДАРСЬКА ДІЯЛЬНІСТЬ НПП «ЦУМАНСЬКА ПУЩА»

3.1. Природно-географічна та просторово-функціональна характеристика Ківерцівського НПП «Цуманська пуша»

Ківерцівський національний природний парк «Цуманська пуша» створено відповідно до Указу Президента України від 22 лютого 2010 р. № 203/2010 для збереження цінних природних комплексів Волинського Полісся та їх раціонального використання. До його складу погоджено включення 33475,34 га земель, з яких 3471,54 га підлягають наданню в постійне користування адміністрації парку, а 30003,8 га включено без вилучення у землекористувачів .

Територія НПП розташована в межиріччі Стиру та Горині, у центрально-східній частині Волинської області, поблизу смт Цумань і м. Ківерці. Парк лежить на південній окраїні Українського Полісся, в зоні переважання сосново-дубових лісів, болотних масивів і заплавних луків . Основними транспортними «воротами» є залізничні станції Цумань, Олика, Ківерці та автошляхи, що з'єднують Луцьк із Рівним та населеними пунктами Ківерцівської громади .

Сучасні оцінки площі парку в різних джерелах дещо відрізняються (зокрема, у популярних еколого-просвітницьких ресурсах наводиться величина близько 34,5 тис. га), однак офіційні параметри, наведені в указі про створення парку, залишаються базовими для наукових і природоохоронних розрахунків . Незалежно від уточнень площі, Ківерцівський НПП «Цуманська пуша» розглядається як один із найбільших осередків збережених лісових ландшафтів Волинського Полісся.

За даними офіційних природоохоронних порталів, у межах НПП налічується понад 600 км туристичних маршрутів, десятки річок, озер та джерел, а також сотні видів флори і фауни, частина з яких занесена до Червоної книги України й охороняється на європейському рівні . Саме поєднання високої

лісистості, розвиненої гідромережі та значної кількості рідкісних біотопів обумовлює виняткову природоохоронну цінність парку.

Територія НПП сформована за змішаною моделлю: частина земель передається парку у постійне користування, решта – лише включається до його території без зміни землекористувача. Такий підхід дозволяє поєднати режим охорони природно-заповідного фонду з діяльністю державних лісогосподарських та інших підприємств, що традиційно працюють на цій території.

Перша складова території – земельні ділянки загальною площею 3471,54 га, які передбачено надати адміністрації НПП «Думанська пуща» у постійне користування. Основну частину цих земель становлять: ділянки, що виділені районною державною адміністрацією; лісові масиви колишнього ДП «Думанське лісове господарство»; менші за площею наділи, передані комунальними лісогосподарськими підприємствами та органами місцевого самоврядування.

У чинному проекті організації території (станом на час підготовки роботи) ці землі розглядаються як просторове «ядро» парку, де розміщуються адміністративні об'єкти, екоосвітня інфраструктура, частина заповідної й рекреаційної зон [27-29]. Структуру земельних ділянок, переданих у постійне користування НПП, відображено на рис. 3.1.

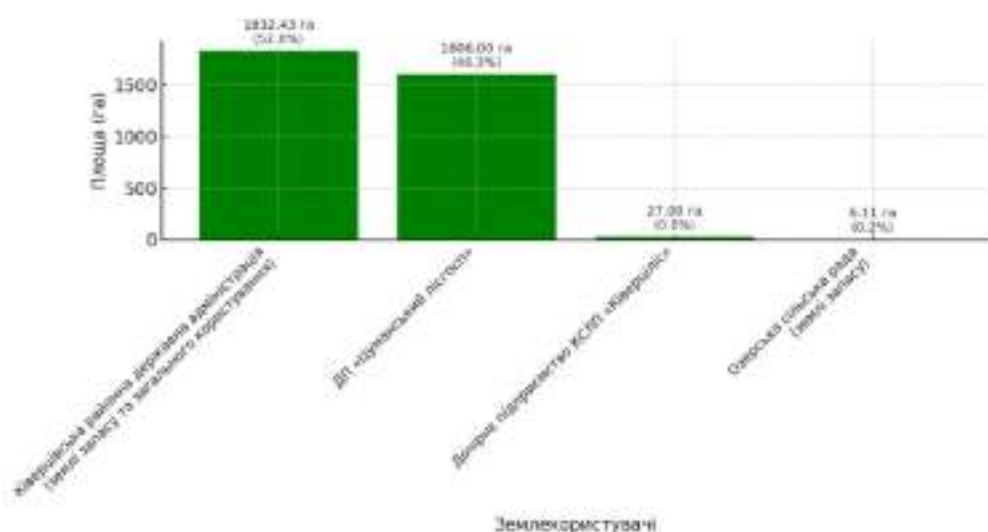


Рисунок 3.1 – Структура земельних ділянок наданих Ківерцівському НПП «Думанська пуща» у постійне користування (за [29])

Друга, значно більша за площею, частина парку (більше 30,0 тис. га) формується за рахунок земель, що включаються до його меж без вилучення у постійних землекористувачів. Домінують лісові ділянки Ківерцівського надлісництва та ДП «Волинський військовий лісгосп», на яких продовжує вестися лісогосподарська діяльність, але з урахуванням обмежень, характерних для територій природно-заповідного фонду.

У цьому випадку адміністрація парку виконує координуючу та контрольну функцію: погоджує матеріали лісовпорядкування, режими рубок формування та оздоровлення лісів, заходи з відновлення насаджень тощо. Співвідношення площі основних землекористувачів у межах парку подано на рис. 3.2.

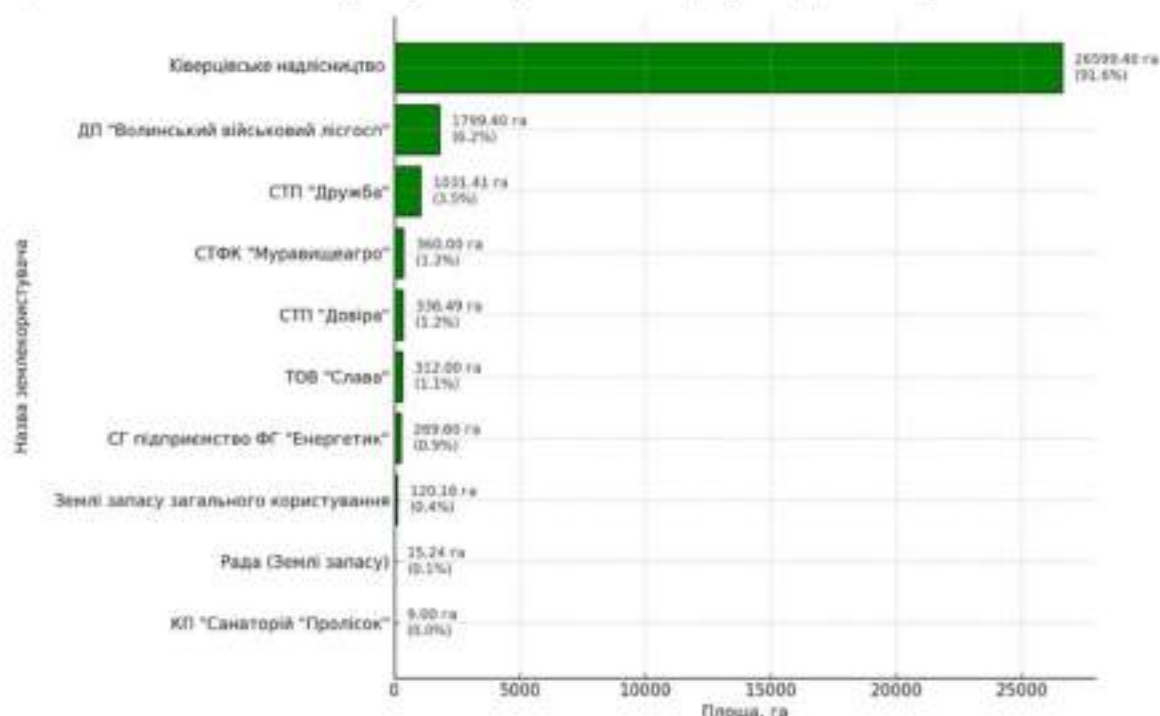


Рисунок 3.2 – Співвідношення земель різних землекористувачів, включених до території Ківерцівського НПП «Думанська пуша» без вилучення (за [29])

У комплексі така структура землекористування обумовлює необхідність постійної взаємодії між адміністрацією НПП, лісогосподарськими підприємствами, органами місцевого самоврядування та обласними структурами, відповідальними за реалізацію державної політики у сфері природно-заповідного фонду.

Організація простору Ківерцівського НПП «Думанська пуша» ґрунтується на системі функціонального зонування, що передбачає виділення територій з

різним режимом охорони, допустимими видами діяльності та рекреаційним навантаженням. У проєктних матеріалах і «Літописі природи» НПП розрізняють чотири основні функціональні зони: заповідну, регульованої рекреації, стаціонарної рекреації та господарську [27].

Заповідна зона охоплює найбільш цінні у природоохоронному відношенні ділянки – старовікові соснові й дубові насадження, ділянки ценотично цінних чорновільхових лісів, боліт і заплавних комплексів. Тут заборонені будь-які види господарської діяльності, окрім спеціально спланованих природоохоронних та наукових заходів. Саме в межах цієї зони розташована значна частина місць, що відповідають вимогам Смарагдової мережі та інших міжнародних природоохоронних ініціатив .

Зона регульованої рекреації призначена для короткочасного відпочинку населення, проведення екскурсій, екологічних стежок, фототурів та інших видів природоорієнтованого туризму. Тут допускається облаштування мінімальної інфраструктури (інформаційні стенди, оглядові майданчики, місця короткочасного відпочинку), причому рекреаційне навантаження має залишатися на рівні, що не призводить до деградації лісових екосистем .

У зоні стаціонарної рекреації зосереджуються рекреаційні комплекси та об'єкти тривалого перебування відвідувачів (санаторно-релакційні заклади, туристичні бази, кемпінги тощо). Умови їх функціонування регламентуються природоохоронними вимогами: обмеженням забудови, контролем за станом водних об'єктів, поводженням з відходами, шумовим та світловим навантаженням .

Найбільшою за площею є господарська зона, в межах якої дозволяється ведення лісового господарства, заготівля недеревних ресурсів, а також проведення рубок формування та оздоровлення лісів, спрямованих на підтримання стійкості насаджень і виконання ними захисних та рекреаційних функцій. Будь-які господарські заходи мають узгоджуватися з адміністрацією парку та враховувати вимоги чинного природоохоронного законодавства .

Узагальнену схему функціонального зонування та просторової організації території НПП «Цуманська пушта» подано на рис. 3.3 і 3.4.

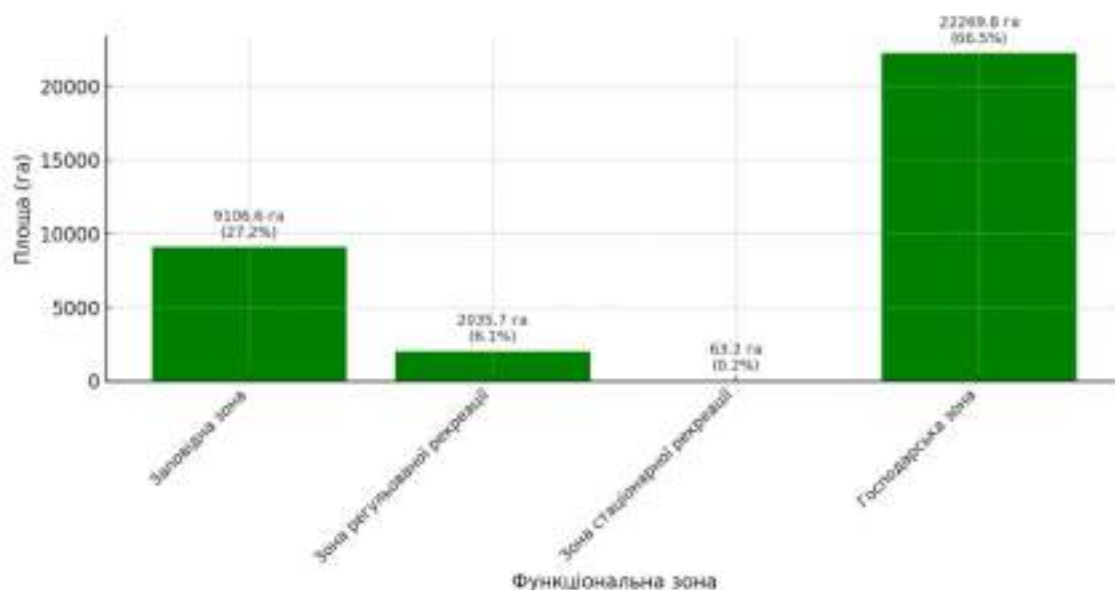


Рисунок 3.3 – Співвідношення основних функціональних зон Ківерцівського НПП «Цуманська пушта» за площею (за матеріалами проекту організації території [27])

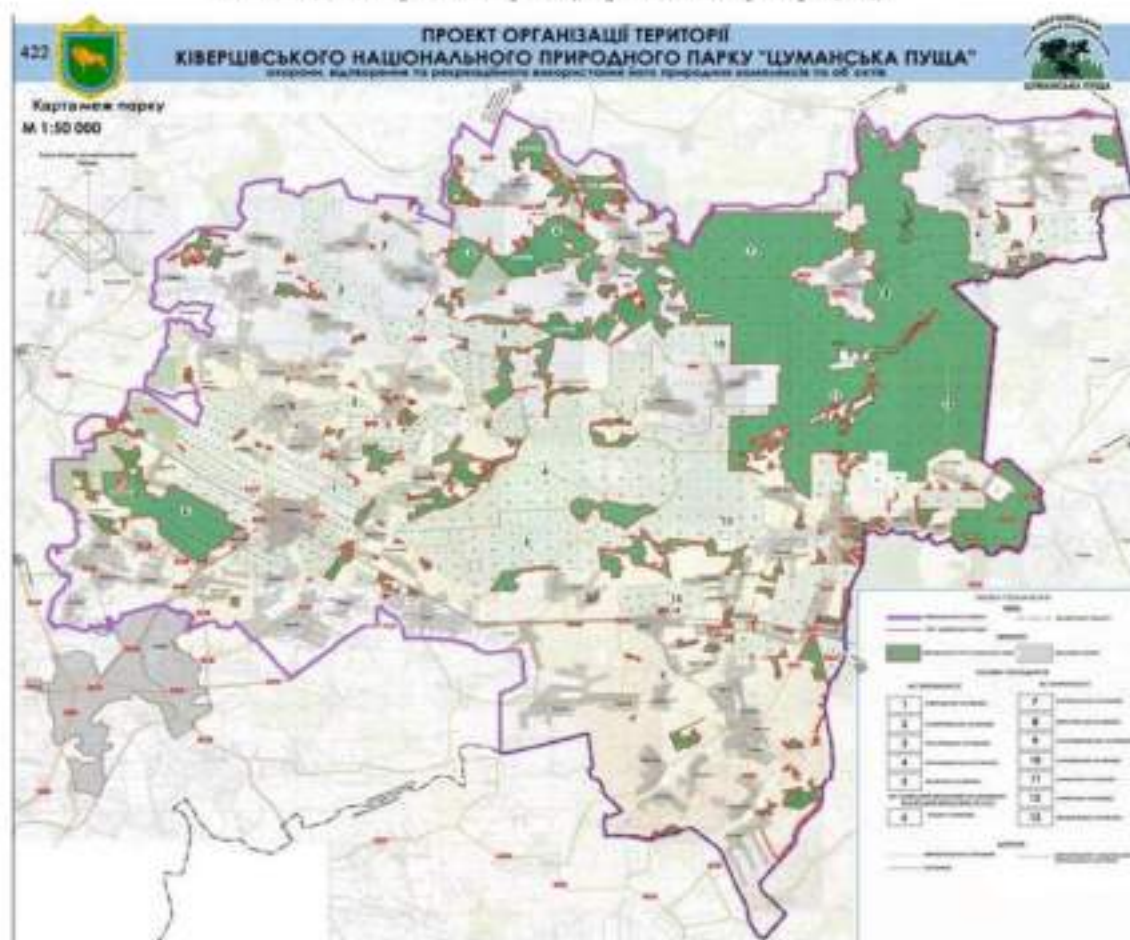


Рисунок 3.4 – Схема просторової організації та функціонального зонування території Ківерцівського НПП «Цуманська пушта» (за [27])

У сукупності функціональне зонування та особливості землекористування забезпечують подвійний характер ролі НПП у регіоні. З одного боку, парк виступає ключовим елементом екологічної мережі Волинського Полісся, забезпечуючи цілісність лісових масивів, міграційні коридори для тварин і збереження рідкісних оселищ. З іншого – він інтегрує природоохоронні, рекреаційні та господарські функції, що дозволяє поєднувати охорону старовікових лісів із потребами місцевих громад та регіональної економіки.

3.2. Природно-кліматичні та гідрологічно-грунтові умови Ківерцівського НПП «Цуманська пуша»

Ківерцівський НПП «Цуманська пуша» розташований у південній частині Українського Полісся, у межах Волинської області, й належить до зони помірно континентального клімату з м'якою зимою та помірно теплим літом. Для характеристики клімату парку доцільно використовувати дані метеостанції Луцьк, яка репрезентує регіональні кліматичні умови. За сучасними кліматичними нормами (1991–2020 рр.) середньорічна температура повітря становить близько 8,4–8,8 °С, а річна кількість опадів – орієнтовно 600 мм.

На рис. 3.5 наведено середньомісячний хід температури повітря за даними багаторічних спостережень. Найхолоднішим місяцем є січень із середньою температурою близько –3...–4 °С, тоді як найтеплішим місяцем є липень із середньою температурою близько 19 °С. Такий річний хід температур формує виражену сезонність: тривалу вегетаційну пору з кінця квітня – початку травня до вересня та період зимового спокою деревної рослинності з листопада до березня.

Розподіл опадів протягом року подано на рис. 3.6. Найбільша кількість опадів припадає на літні місяці, насамперед липень, коли середньомісячна сума може досягати 60–100 мм, а також на жовтень (95 мм), тоді як мінімум опадів спостерігається у травні (близько 15 мм). Переважання літніх дощів зумовлює добру зволоженість ґрунтів у період активного росту насаджень, а порівняно

м'яка зима з частими відлигами сприяє поступовому промерзанню та відтаванню ґрунту, що є типовим для Полісся.

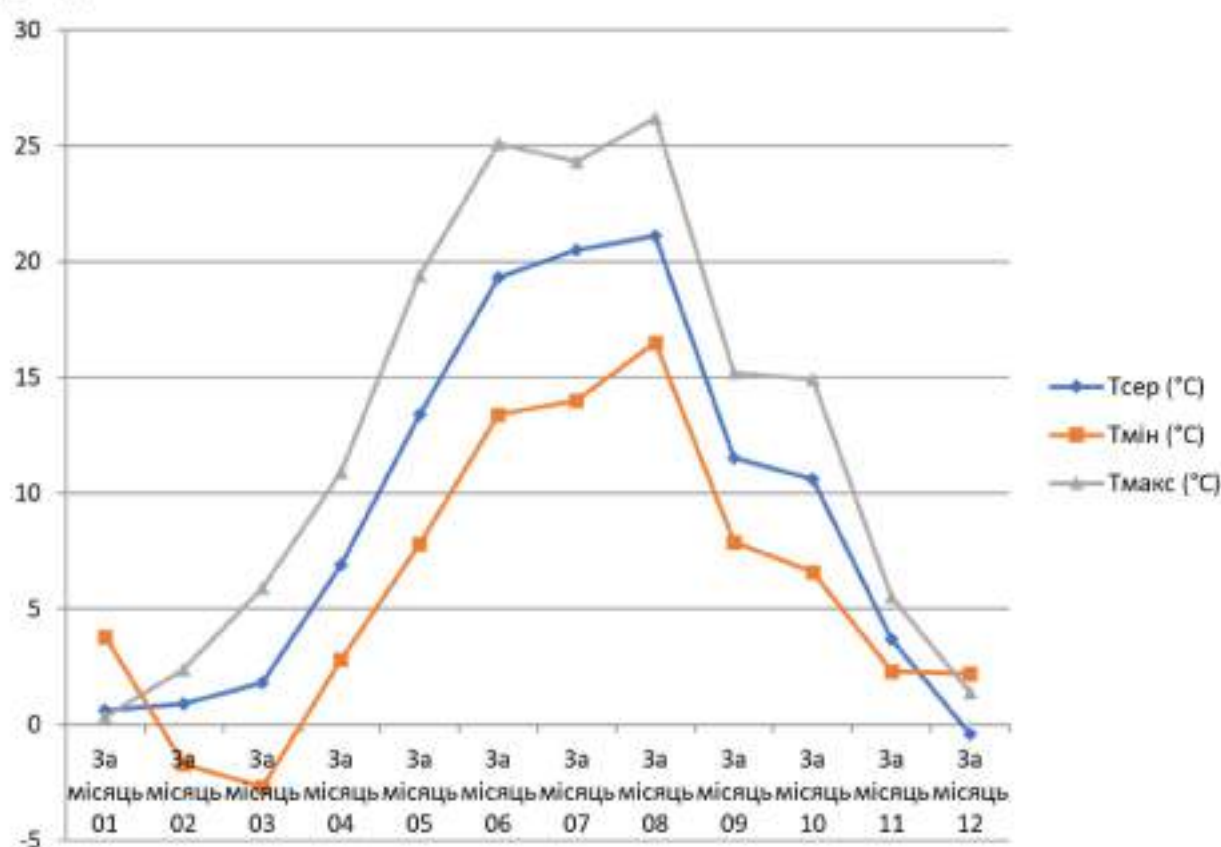


Рисунок 3.5 – Середньомісячні температури території НПП

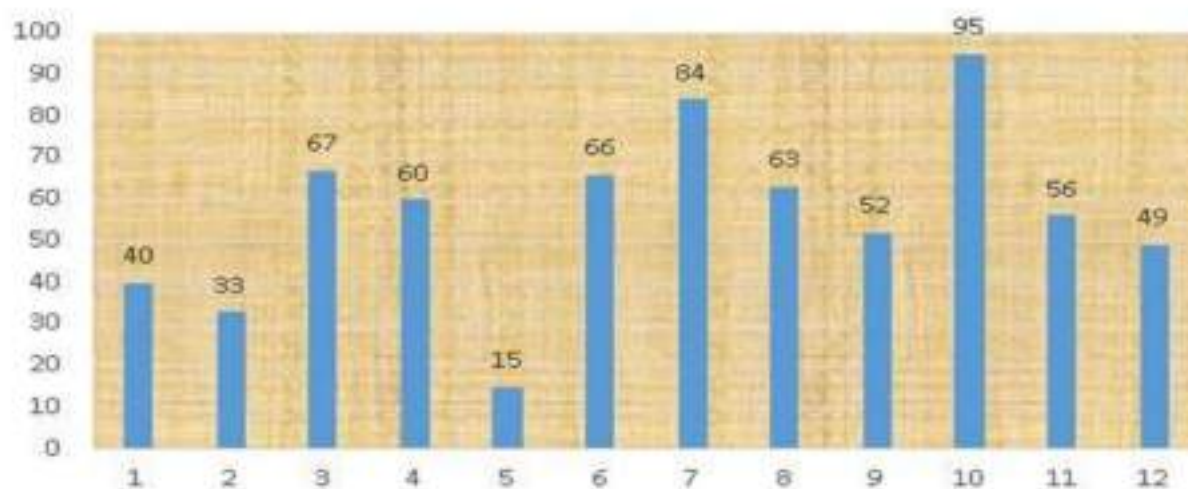


Рисунок 3.6 – Середньомісячна кількість опадів території НПП, мм

За даними «Літопису природи» НПП та регіональних спостережень, вітровий режим характеризується переважанням вітрів західного, північно-західного та південно-західного напрямків, що відображено на розі вітрів (рис. 3.7). Таке переважання західної циркуляції зумовлює надходження вологих повітряних мас з Атлантики, що підсилює опади та пом'якшує температурний

режим території парку [29]. Вітровий режим має важливе значення для формування снігового покриву, вітровальних процесів у насадженнях та перенесення спор патогенних грибів, зокрема збудників некрозів кори й гнилей стовбурів.

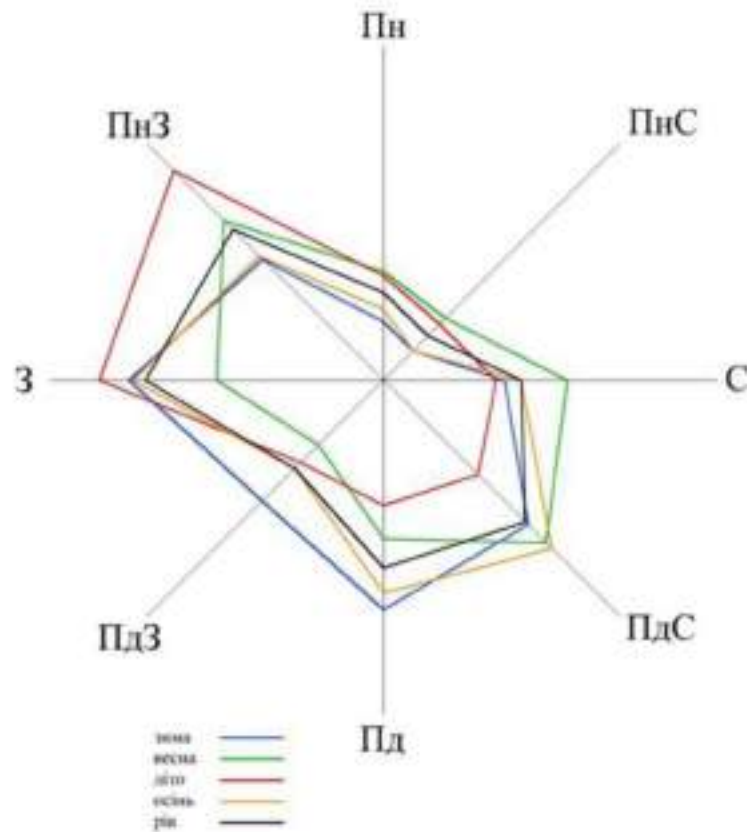


Рисунок 3.7 – Роза вітрів на території НПП

Гідромережа території тісно пов'язана з положенням парку в басейні річки Горинь – однієї з найбільших правих приток Прип'яті. Річка Горинь має загальну довжину 659 км і площу басейну 27,7 тис. км², перетинаючи Волинську та Рівненську області й формуючи широку, місцями заболочену долину. Центральну частину НПП «Цуманська пуща» дренує її притока Путилівка, довжина якої становить 43,76 км, а басейн повністю лежить у межах лісової зони. У межах парку та прилеглих територій у гідромережу також входять менші водотоки, зокрема річка Сичівка – ліва притока Путилівки, довжиною 14,25 км.

Річкові долини Путилівки та Горині формують розгалужену систему заплавних лук, вільшняків та заболочених ділянок, що виконують роль природних акумуляторів вологи. У структурі гідрологічної мережі важливе місце

належить меліоративним каналам і старицям, які є наслідком попередньої меліорації й одночасно зберігають залишки природних болотних екосистем. Основні характеристики ключових водотоків подані в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Основні річки та малі водотоки в межах і поблизу НПП «Цуманська пуща» (узагальнено за [29; 34; 35])

Назва водотоку	Басейн, гідрологічна роль	Загальна довжина, км	Характер течії та заповни в межах парку
Горинь	Права притока Прип'яті; одна з головних річок Полісся	659	Широка, місцями заболочена долина; заплавні ліси, луки, місцями осушувальні канали
Путилівка	Притока Стубелки (басейн Горині); головний водотік у центральній частині пущі	43,76	Слабко звивиста, з переважанням низинних боліт та вільшняків у заплаві; важливі місця гніздування птахів
Сичівка	Ліва притока Путилівки	14,25	Невеликий рівнинний водотік, заплава якого зайнята лісами та осушеними ділянками колишніх боліт

Наявність густої гідромережі й великої кількості заболочених та слабо дренажованих ділянок створює сприятливі умови для формування вологих та надмірно вологих типів лісу, що мають ключове значення для збереження біорізноманіття та підтримання стійкості лісових екосистем до кліматичних аномалій [29–31; 35].

Грунтовий покрив НПП «Цуманська пуща» відображає поєднання поліських піщаних терас і понижень із торфово-болотними комплексами. За матеріалами лісовпорядкування та «Літопису природи» [29], на більшій частині території переважають дерново-підзолисті піщані й супіщані ґрунти, сформовані на водно-льодовикових відкладах. Вони відзначаються невеликою потужністю гумусового горизонту, високою фільтраційною здатністю та схильністю до пересихання на підвищених елементах рельєфу. Саме на таких ґрунтах при оптимальному рівні ґрунтових вод формуються продуктивні соснові бори.

Значну площу займають також торфово-болотні ґрунти заповни і понижень мікрорельєфу. Вони представлені низинними торфовищами різного ступеня осушення, де поширені вільхово-осикові та березово-чорновільшнякові ліси. Лучні та лучно-болотні ґрунти приурочені до заплавних лук уздовж Путилівки й Горині, де вони використовуються як кормова база для копитних та місце

гніздування водно-болотної орнітофауни. Основні типи ґрунтів, їх поширення та частка в структурі земель відображені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Типи ґрунтів території Ківерцівського НПП «Цуманська пуща» (за матеріалами лісовпорядкування та [29])

Тип ґрунту	Площа (га)	Частка від загальної площі (%)
Підзолисті ґрунти	22473,6	65,2
Дернові ґрунти	6518,7	18,9
Болотні ґрунти	3828,1	11,1
Інші ґрунти	1654,6	4,8
Всього	34475,0	100

Поєднання достатньо вологого, помірно теплого клімату, розгалуженої гідромережі та ґрунтів із різним ступенем зволоження зумовлює високе екологічне різноманіття НПП «Цуманська пуща». Саме абіотичні чинники – клімат, водний режим і ґрунтові умови – визначають зональну перевагу соснових та мішаних лісів, розвиток заболочених угідь і високу чутливість екосистем до змін гідрологічного балансу, кліматичних аномалій та антропогенних впливів.

3.3. Лісовий фонд Ківерцівського НПП «Цуманська пуща» та його структура

Лісовий фонд Ківерцівського національного природного парку «Цуманська пуща» формує основне природне ядро парку та визначає його екологічний потенціал. Просторовий розподіл лісів між постійними лісокористувачами, породний склад, вікова структура, продуктивність та типологічні особливості насаджень відображають як природні умови, так і історію господарського освоєння території.

Найбільший масив лісів у межах парку зосереджений у користуванні Ківерцівського надлісництва, якому належать 22626,56 га лісових земель. Значно менші, але важливі з огляду на охоронну функцію площі припадають безпосередньо на НПП «Цуманська пуща» – 1995,44 га. Ще одним вагомим лісокористувачем є ДП «Волинський військовий лісгосп» із площею 1747,4 га. Розподіл цих ділянок між основними землекористувачами схематично подано на рис. 3.8 (додаток Б).

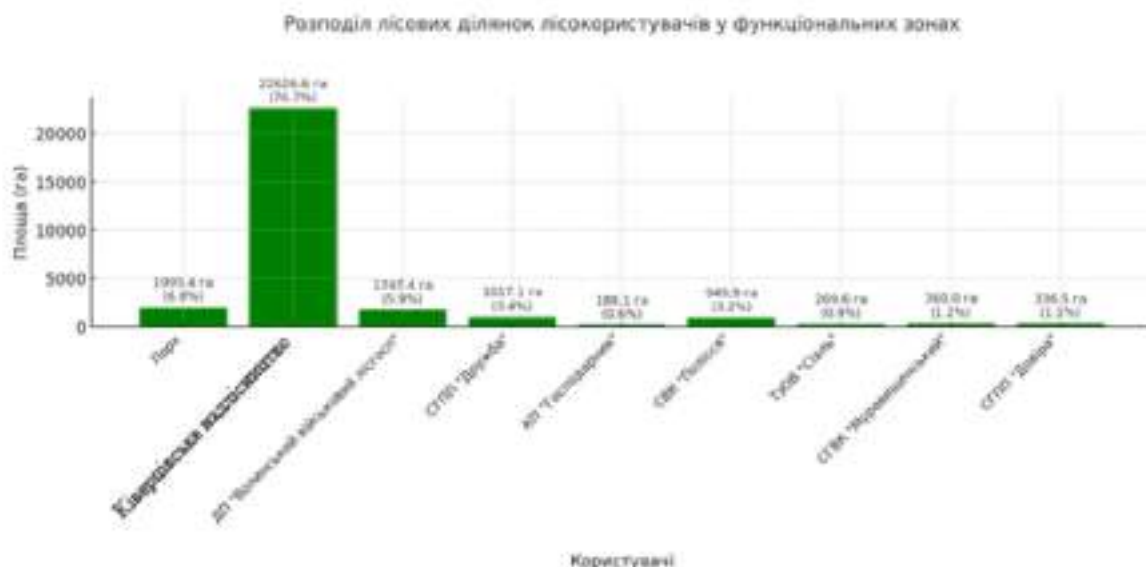


Рисунок 3.8 – Розподіл лісових ділянок НПП між лісокористувачами

Такий характер розподілу свідчить про те, що значна частина лісів, включених до меж парку, й надалі використовується у господарській діяльності державних лісогосподарських підприємств, тоді як власне парк виконує, передусім, координаційну та природоохоронну функції.

За категоріями земель найбільшу площу в структурі лісового фонду займають ділянки, вкриті лісовою рослинністю, – 27634,0 га (рис. 3.9).

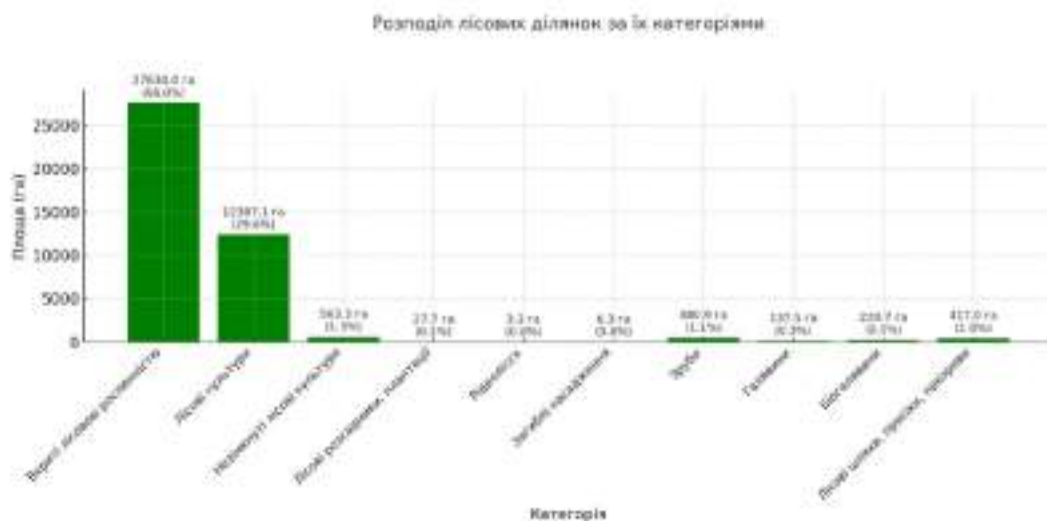


Рисунок 3.9 – Категорії лісових ділянок НПП

В межах цієї категорії виділяється значний масив лісових культур площею 12387,1 га, що свідчить про високу частку штучно створених насаджень і тривалу історію цілеспрямованого лісовідновлення на території парку. Інші складові фонду – зруби, галювини, просіки, лісові дороги та інші мало вкриті або некріті

лісом площі – займають набагато меншу частку, виконуючи переважно допоміжні або тимчасові функції в структурі лісокористування.

Таким чином, лісовий фонд НПП «Цуманська пуша» характеризується високим рівнем залісеності та значною питомою вагою штучно створених насаджень, що важливо враховувати при оцінці їхньої стійкості та санітарного стану.

Породний склад насаджень формується переважно кількома домінантами. Найбільшу площу займають соснові ліси: сосна звичайна (*Pinus sylvestris* L.) становить 11307,9 га лісових насаджень. Друге місце за площею посідають дубові насадження з участю дуба звичайного (*Quercus robur* L.) – 5592,0 га. Важливу роль у формуванні гідроморфних лісових екосистем відіграє вільха чорна (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.), площа насаджень якої становить 1325,4 га. Береза повисла (*Betula pendula* Roth) займає 2349,4 га, формуючи як чисті, так і змішані деревостани. Інші породи (верба, модрина, поодинокі інші інтродуценти) займають відносно невеликі площі (рис. 3.10).

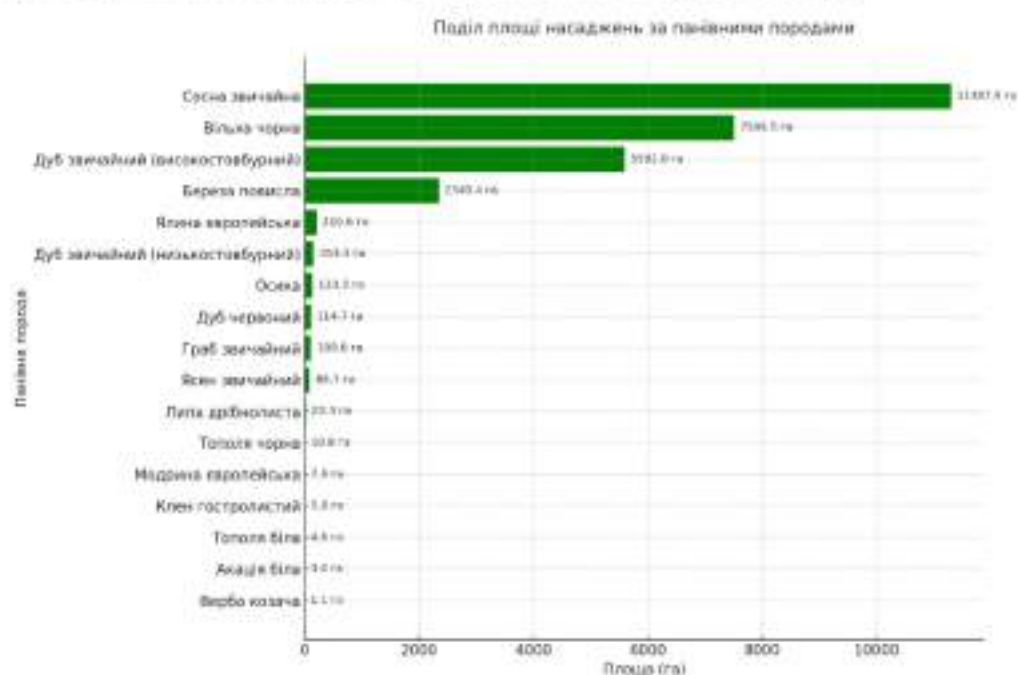


Рисунок 3.10 – Розподіл площі насаджень НПП за панівними породами

Структура запасу деревини за породами загалом віддзеркалює розподіл площ, але з певними акцентами. Найбільший сукупний запас має сосна звичайна — 3105,77 тис. м³, що підкреслює її ключову роль у формуванні ресурсного потенціалу парку. Вільха чорна, незважаючи на меншу площу, накопичує

значний запас – 1361,48 тис. м³, що зумовлено високою продуктивністю чорновільхових насаджень на вологих і сирих ґрунтах. Запас дуба звичайного становить 1010,74 тис. м³, а берези повислої — 422,17 тис. м³ (рис. 3.11).

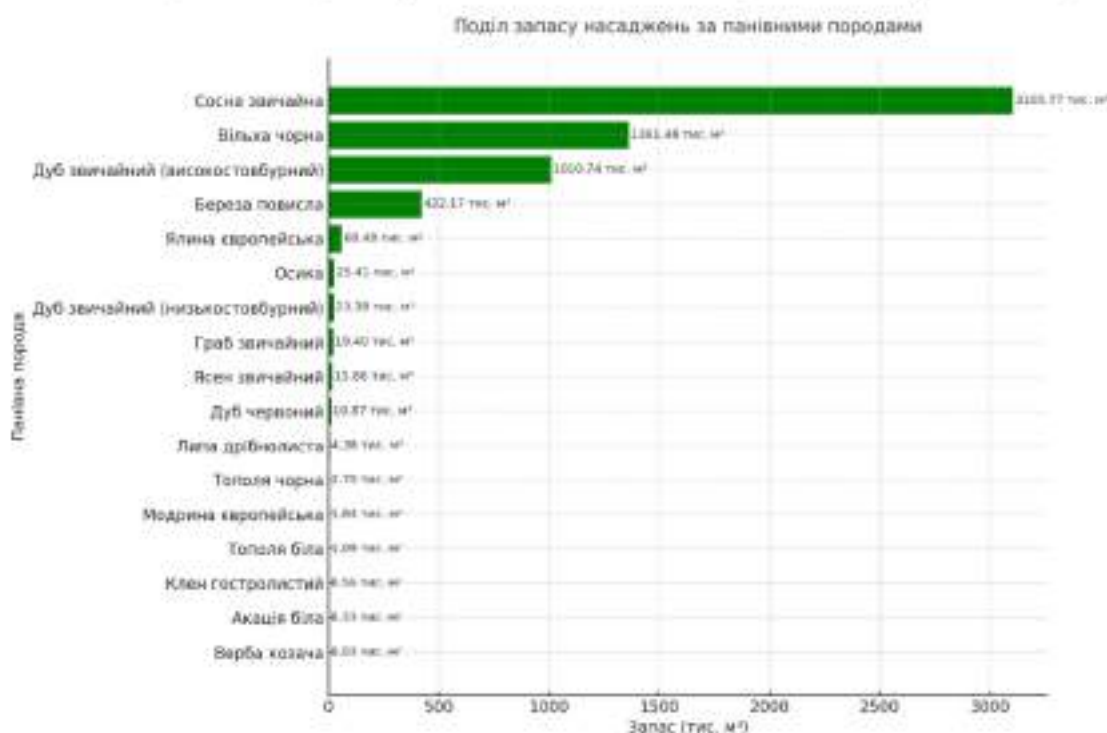


Рисунок 3.11 – Розподіл запасу насаджень НПП за панівними породами

Отже, лісовий фонд парку має виразно хвойно-широколистий характер із домінуванням сосни та вагомою участю дуба й вільхи, що забезпечує поєднання високої продуктивності з екологічною різноманітністю.

Вікова структура насаджень є відносно збалансованою. Молоді насадження (I та II вікові групи) займають близько 35% лісової площі й представлені переважно сосною звичайною, березою та вільхою, що сформувалися як після суцільних рубок, так і внаслідок лісовідновних заходів. Середньовікові та пристиглі деревостани охоплюють приблизно 45% площі й вирізняються найбільш інтенсивним приростом деревини, забезпечуючи основний внесок у поточний приріст та запас. Стиглі й перестійні ліси становлять близько 20% площі, концентруючись головним чином у заповідній зоні та окремих ділянках рекреаційних зон; вони представлені старовіковими дубовими та сосновими масивами, які мають ключове значення для збереження біорізноманіття та виконання природоохоронних функцій (рис. 3.12, додаток В).

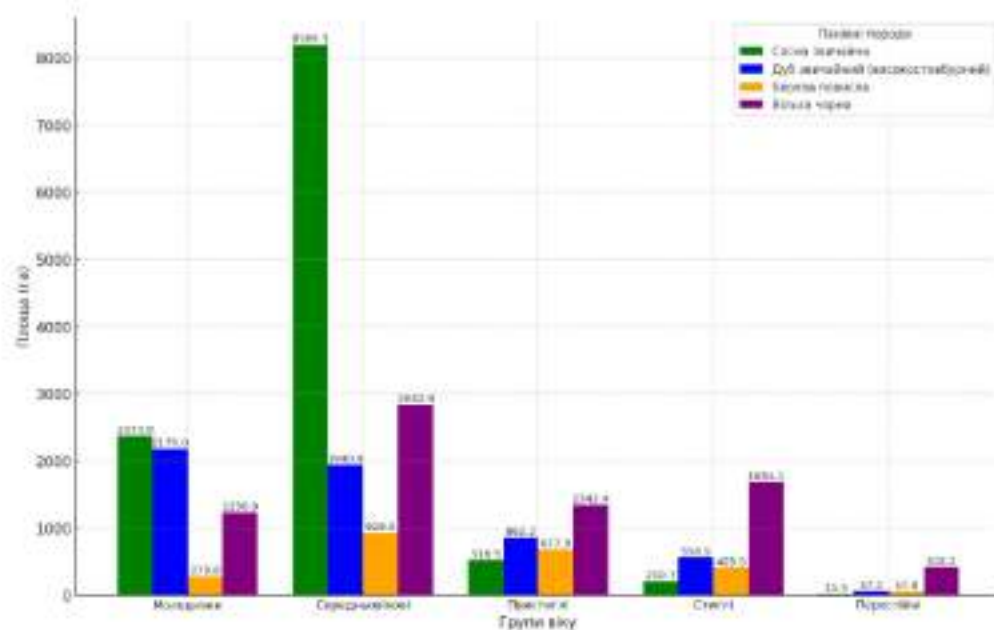


Рисунок 3.12 – Розподіл насаджень найбільш поширених порід НПП за групами віку

Серед окремих порід найбільшу площу середньовікових насаджень має сосна звичайна — 8189,3 га. Дуб звичайний домінує у групі молодняків (2198,0 га), що відображає активну роботу з лісовідновлення дубових культур. Вільха чорна переважає у середньовікових насадженнях (2832,9 га), а береза повисла має відносно рівномірний віковий розподіл із найбільшою часткою площі також у середньовікових деревостанах (929,0 га).

Таким чином, вікова структура лісів НПП «Цуманська пуща» поєднує значну частку стиглих та перестійних насаджень у природоохоронних зонах із потужним фондом молодих і середньовікових насаджень, що є резервом для майбутнього формування високопродуктивних лісів.

Розподіл площі вкритих лісовою рослинністю ділянок за класами бонітету свідчить про високий потенціал продуктивності лісів парку (рис. 3.13, додаток Г). Найбільшу площу займають насадження класу бонітету I — 10647,1 га (38,54% загальної площі). Друге місце посідають насадження класу II з площею 8962,6 га (32,44%). Високопродуктивні насадження класу Ia охоплюють 5057,4 га (18,31%). Натомість площі насаджень нижчих класів бонітету є незначними: клас Ib представлений 462,8 га (1,68%), а клас V — лише 0,5 га (0,01%).

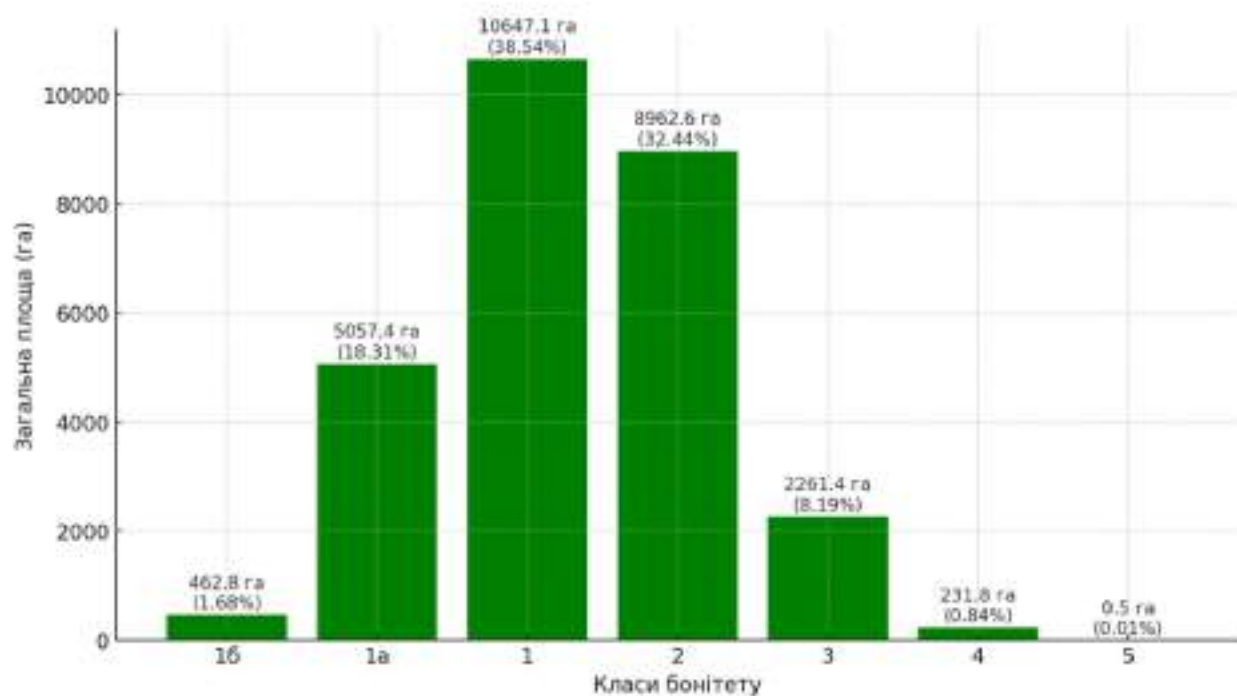


Рисунок 3.13 –Розподіл лісових насаджень НПП за класами бонітету

Сукупно це означає, що понад 89% площі вкритих лісовою рослинністю ділянок припадає на насадження класів Іа–ІІ, тобто на високопродуктивні ліси, які формують основний запас деревини та забезпечують значний екологічний ефект.

Аналіз розподілу площі основних деревних порід за класами бонітету показує, що сосна звичайна має найбільші площі в класі І (5417,1 га), що підтверджує її високу продуктивність у місцевих умовах. Дуб звичайний (високостовбурний) має значні площі в класах І (1330,0 га) та ІІ (3390,1 га), береза повисла переважно зосереджена в класах І (1038,8 га) та ІІ (554,6 га), а вільха чорна демонструє високі площі в класах І (2643,8 га) та ІІ (3247,2 га).

Отже, ключові деревні породи формують переважно високобонітетні насадження, що є вагомим передумовою для сталого використання лісових ресурсів за умови дотримання природоохоронних обмежень.

Розподіл площ насаджень за повнотою свідчить про переважання оптимально зімкнених деревостанів (рис. 3.14, додаток Д). Найбільшу площу займають насадження з повнотою 0,7 — 12617,6 га. Значна частка припадає також на насадження з повнотою 0,8 — 6778,6 га. Меншу частку становлять насадження з повнотою 0,5 (1192,9 га) та 0,4 (277,9 га). Дуже нечисленними є

деревостани з низькою повнотою 0,3 (105,6 га) та максимальною повнотою 1,0 (49,3 га).

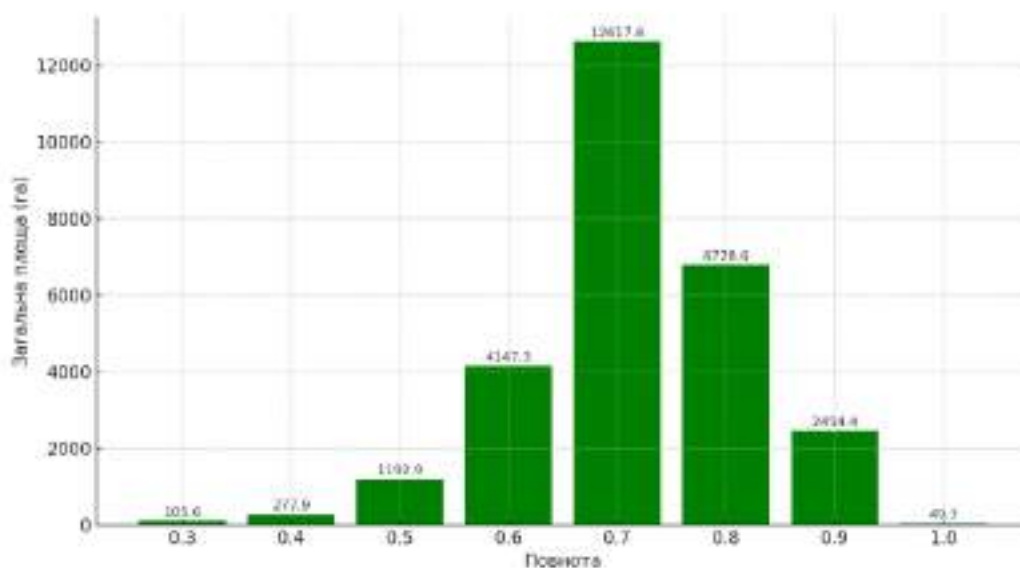


Рисунок 3.14 – Розподіл насаджень НПЗ за класами повнотами

Такий розподіл свідчить про те, що більшість насаджень характеризуються близькою до оптимальної густотою, яка забезпечує добрий баланс між продуктивністю, стійкістю та можливістю природного поновлення. Водночас наявність площ із низькою повнотою може вказувати на ділянки після інтенсивних рубок чи пошкоджень, де необхідні посилені лісовідновні заходи.

Узагальнення таксаційних показників за функціональними зонами парку (табл. 3.3) демонструє суттєві відмінності у віці, повноті, середньорічному прирості та запасі деревини на 1 га.

Таблиця 3.3 – Узагальненні таксаційні показники насаджень НПЗ

Показник	Значення				
	Заповідна	Стационарної рекреації	Регульованої рекреації	Господарська	Загальне по парку
Вік, років	73	73	74	49	58
Повнота	0.71	0.72	0.70	0.71	0.71
Середня зміна запасу, м ³ на 1 га	3.6	4.6	4.5	4.0	3.9
Запас, м ³ на 1 га	238	333	323	202	220

У зоні регульованої рекреації середній вік насаджень сягає 74 років, тоді як у заповідній зоні та зоні стаціонарної рекреації він становить 73 роки. Наймолодші деревостани зосереджені в господарській зоні, де середній вік дорівнює 49 рокам; загалом по парку середній вік становить 58 років.

Повнота в усіх зонах є стабільною й перебуває в межах 0,70–0,72, при цьому середнє значення для парку становить 0,71. Середня зміна запасу деревини на 1 га варіює від 3,6 м³/га у заповідній зоні до 4,6 м³/га у зоні стаціонарної рекреації, тоді як у господарській зоні цей показник становить 4,0 м³/га, а загалом по парку — 3,9 м³/га. Найвищі запаси деревини фіксуються у зоні стаціонарної рекреації (333 м³/га) та зоні регульованої рекреації (323 м³/га), тоді як у господарській зоні запас становить 202 м³/га; у заповідній зоні — 238 м³/га.

Ці дані відображають закономірність: найстаріші й найбільш запасні насадження зосереджені в зонах з обмеженим господарським впливом, тоді як у господарській зоні переважають молоді ліси з нижчим запасом, але відносно високою інтенсивністю приросту.

Типологічна будова лісів НПП «Цуманська пуша» чітко відображає гідрологічні та ґрунтові умови Полісся. Домінують сирі чорновільхові сугрудки (С4ВЛЧ), площа яких становить 5504,5 га (19,92% від загальної площі лісів), та вологі грабово-соснові судіброви (С3ГСД) площею 4793,7 га (17,35%). Значні площі займають також свіжі грабово-дубово-соснові сугрудки (С2ГДС) — 3583,1 га (12,97%) і вологі дубово-соснові субори — 3435,4 га (12,43%) (рис. 3.15).

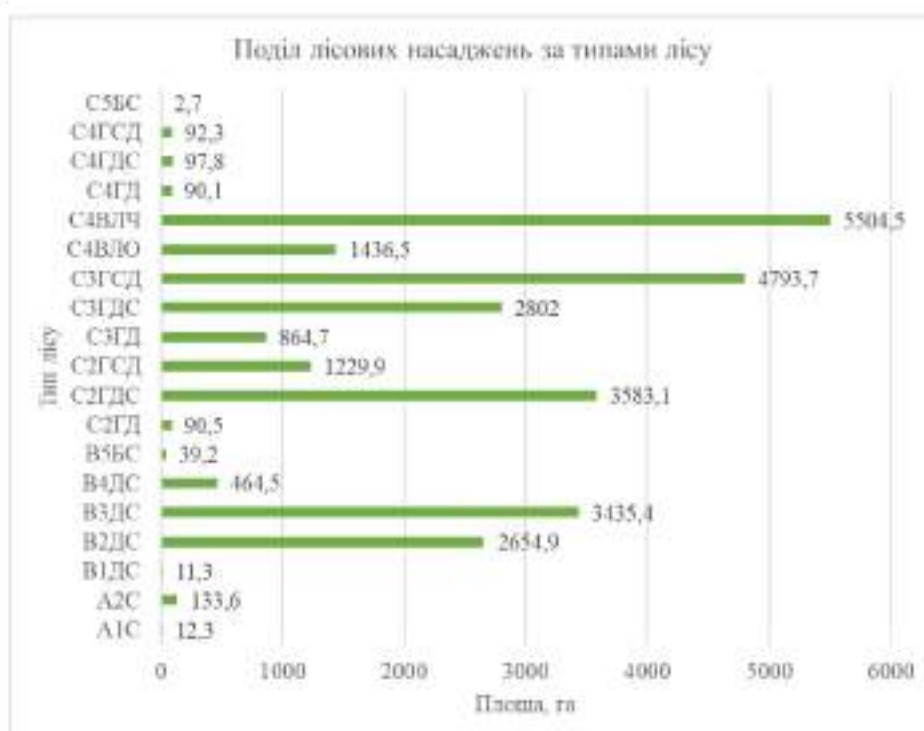


Рисунок 3.15 – Типологічна структура деревостанів НПП

Разом ці чотири типи лісу охоплюють понад третину площі лісового фонду і визначають основні риси лісових екосистем парку: поєднання високопродуктивних хвойно-широколистих насаджень із добре зволженими ґрунтами. Переважання сирих і вологих типів лісу, насамперед чорновільхових сугрудків, підкреслює важливу роль парку у підтриманні водного балансу регіону, збереженні болотних екосистем і пов'язаного з ними біорізноманіття.

3.4. Лісогосподарська діяльність у межах Ківерцівського НПП «Цуманська пуша»

Лісогосподарська діяльність у межах Ківерцівського НПП «Цуманська пуша» здійснюється на основі матеріалів безперервного лісовпорядкування та Проекту організації території парку, який окреслює функціональні зони й допустимі види використання лісів, насамперед у господарській зоні. У 2018 р. було розпочато системну роботу з уточнення меж земельних ділянок, що підлягають передачі у постійне користування парку, та з актуалізації електронної бази лісовпорядних даних ДП «Цуманський лісгосп». Фахівці ВО «Укрдержліспроєкт» привели у відповідність нумерацію кварталів і виділів, а також попередньо погодили функціональне зонування тих територій, що залишаються у користуванні лісогосподарських підприємств.

Уточнення лісовпорядних даних дало змогу сформуванню більш цілісного уявлення про структуру лісового фонду в межах різних функціональних зон, зокрема господарської, де законодавством дозволені рубки формування й оздоровлення лісів, а також інші лісогосподарські заходи за умови дотримання природоохоронного режиму. Разом з тим оновлення інформаційної бази виявило й певні прогалини: для частини землекористувачів, чії лісові ділянки увійшли до складу парку без вилучення, коригування лісовпорядних баз виконано частково або взагалі не проводилося. Це ускладнює інтегроване планування лісогосподарських заходів на всій території парку та потребує подальшого узгодження просторових даних.

Аналіз фактичної лісогосподарської діяльності ґрунтується на щорічних лісовпорядних матеріалах за період 2013–2017 рр. для території ДП «Цуманський лісгосп», 2013–2016 рр. – для ДП «Ківерцівський лісгосп» та за 2016 р. – для Луцького військового лісництва. У вибірку включали лише ті виділи, на яких у відповідні роки проводилися рубки або інші господарські заходи. Сукупна площа таких ділянок охоплює близько 89 % загальної площі лісів національного парку, що забезпечує достатню репрезентативність при оцінці рівня та характеру лісокористування.

За структурою рубок домінують заходи головного користування, рубки догляду та санітарні рубки. На рис. 3.16 подано розподіл площ, на яких проводилися різні види рубок, а на рис. 3.17 – відповідні обсяги заготовленої деревини.



Рисунок 3.16 – Площа рубок на території НПП



Рисунок 3.17 – Запас рубок на території НПП

Упродовж аналізованого п'ятирічного періоду рубки головного користування забезпечили близько 47,3 % загального обсягу заготівлі. Це пов'язано з тим, що вони зосереджені переважно в господарській зоні, де стиглі та перестійні насадження вводяться у відновлення відповідно до вікових норм рубок. З одного боку, така структура свідчить про значний ресурсний потенціал господарської зони, з іншого – вимагає посиленого контролю за дотриманням лісівничих вимог, щоб не допустити надмірної концентрації суцільних рубок і деградації лісових екосистем.

Рубки догляду (освітлення, прочищення, проріджування та прохідні становлять суттєву частку як за площею, так і за обсягами заготівлі. Їх проведення спрямоване на формування стійких, повноцінних молодняків і середньовікових насаджень, оптимізацію складу та просторової структури деревостанів, а також на підвищення їхнього біологічного й господарського потенціалу. Аналіз динаміки площі і запасу по цих заходах (рис. 3.15, 3.16) свідчить, що у значній частині кварталів доглядові рубки застосовуються систематично, однак їх інтенсивність потребує узгодження з цілями парку щодо пріоритету природоохоронних функцій.

Особливу увагу привертає наявність суцільних санітарних рубок, переважно у соснових насадженнях. Їх проведення зумовлене масовим усиханням та пошкодженням дерев комплексом біотичних і абіотичних чинників, зокрема стовбуровими шкідниками та грибними патогенами, про що свідчать результати окремих досліджень санітарного стану дубових та соснових лісостанів парку. Суцільні санітарні рубки дозволяють оперативно вилучати осередки уражених дерев, зменшуючи ризик подальшого поширення шкідників і хвороб, але їхня частота й площа є індикатором загального ослаблення лісів та недостатньої ефективності профілактичних заходів. Це підкреслює необхідність посиленого моніторингу фітосанітарного стану й переходу до більш раннього виявлення осередків ослаблення.

Розподіл площі та запасу деревини, отриманої під час рубок, за панівними породами (рис. 3.18, 3.19) відображає загальну структуру лісового фонду парку:

основна частка заготовленої деревини припадає на сосну звичайну, значні обсяги – на дуб звичайний, вільху чорну та березу повислу. Це відповідає їх домінуванню в структурі площі і запасу деревостанів та підтверджує, що саме ці породи є ключовими для планування як рубок, так і відновлювальних заходів.



Рисунок 3.18 – Розподіл площі рубок за панівними породами



Рисунок 3.19 – Розподіл запасу рубок за панівними породами

На території Ківерцівського НПП «Думанська Пуща» за результатами останніх лісовпорядних заходів виявлено 38,1 га лісових культур віком понад 100 років, що свідчить про тривалу практику лісовідновлення на цій території.

Максимальні площі лісових культур займають такі панівні породи (рис. 3.20, додаток Е) як сосна звичайна, вільха чорна, дуб звичайний, береза повисла.



Рисунок 3.20 – Загальна площа і площа лісових культур НПП

Відтворення лісів здійснюється шляхом створення лісових культур та природного поновлення. Сосна звичайна переважає у рубках і в лісових культурах завдяки високій продуктивності. Вільха чорна виконує важливу екологічну роль, зокрема, для збереженні водного балансу. Дуб звичайний дає високоякісну деревину, береза повисла сприяє формуванню змішаних лісів.

У цілому лісогосподарська діяльність у Ківерцівському НПП «Думанська пуща» характеризується поєднанням інтенсивних господарських заходів у господарській зоні з обмеженим або повністю забороненим лісокористуванням

у заповідній та частині рекреаційних зон. Такий підхід відповідає сучасним вимогам до управління національними парками. У перспективі важливим завданням є подальша інтеграція лісовпорядних даних усіх землекористувачів, розширення практики вибіркового і наближеного до природних рубок, а також ув'язка планування лісогосподарських заходів із результатами дистанційного моніторингу санітарного стану лісів.

РОЗДІЛ 4

ОЦІНКА САНІТАРНОГО СТАНУ ЛІСІВ НПП «ДУМАНСЬКА ПУЩА» НА ОСНОВІ ІНТЕГРАЦІЇ НАЗЕМНИХ ТА СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ

4.1. Підготовка даних та характеристика вибраних кварталів парку

Під час попередньої підготовки даних була попередньо оцифрована картосхема парку (рис. 4.1).

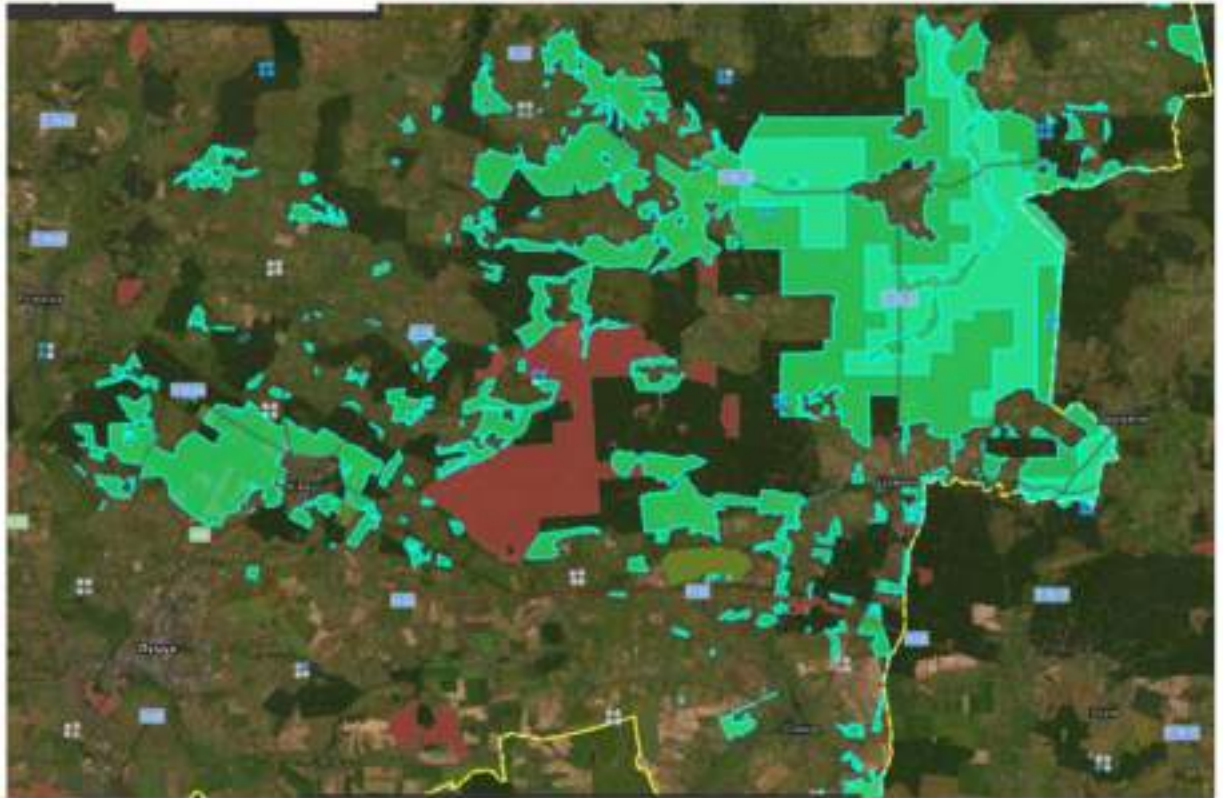


Рисунок 4.1 – Оцифрована картосхема території НПП

Для дослідження обрано чотири репрезентативні лісові квартали парку різних функціональних зон (господарської, стаціонарної та регульованої рекреації та заповідної) – №5, 28, 26 і 3. Їх характеристики наведені у табл. 4.1 а фото на рис. 4.2.

Таблиця 4.1 – Кwartали парку, вибрані для детального аналізу

№ кварталу	Лісництво	Функціональна зона	Площа, га
5	Сильненське	Господарська зона	114.69
28	Партизанське	Зона стаціонарної рекреації	102.42
26	Ківерцівське	Зона регульованої рекреації	74.08
3	Берестянське	Заповідна зона	51.47

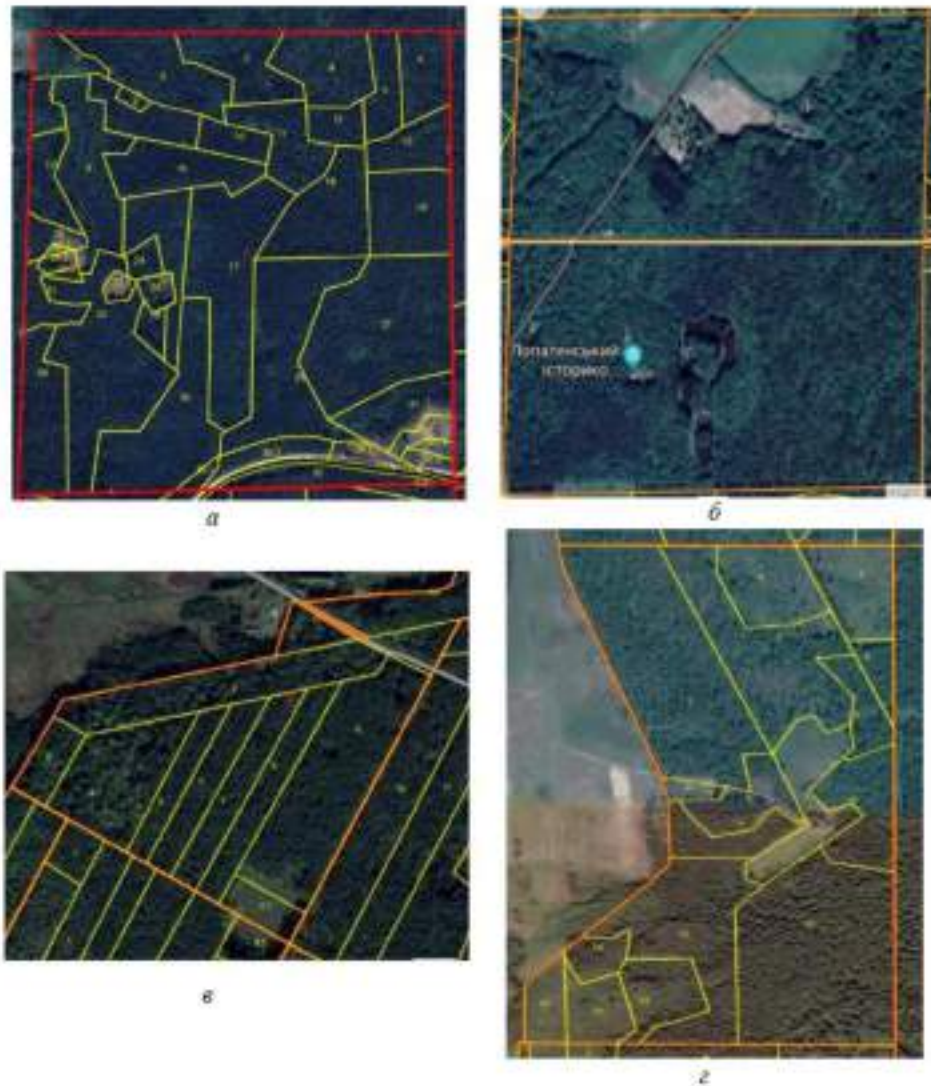


Рисунок 4.2 – Квартали, вибрані для проведення досліджень: а – квартал 5 Сильненське лісництво, б – квартал 28 Партизанське лісництво; в – квартал 26 Ківерцівське лісництво, г – квартал 3 Берестянське лісництво

Вибір кварталів зумовлений технічною можливістю точної геоприв'язки матеріалів лісовпорядкування та мінімальною хмарністю на супутникових знімках для цих ділянок. Це забезпечило високу якість зіставлення наземних і дистанційних даних. Попередньо на основі космічних знімків (Google Earth та Esri, оновлених у 2019 р.) було створено актуалізовану цифрову карту кварталної сітки парку. У програмі QGIS виконано оцифрування меж кварталів і виділів, класифікацію території за типом покриття («лісова» чи «нелісова» площа) та розрахунок площ полігонів за допомогою ГІС-функцій. Отримана базова геоінформаційна база стала основою для подальшої інтеграції наземних показників та супутникових індексів (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Результати дешифрування супутникових даних для вибраних кварталів

Квартал	Площа за лісовпорядкуванням, га	Площа за ДЗЗ, га	Незаліснені території за лісовпорядкуванням, га	Незаліснені території за ДЗЗ, га	Втрата лісу за ДЗЗ, га	Нові насадження за ДЗЗ, га
5	114,69	114,20	12,3	14,8	5,2	2,8
28	102,42	101,80	26,7	25,2	1,2	2,4
26	74,08	74,60	4,6	4,4	0,4	0,6
3	51,47	51,20	5,2	4,8	0,5	0,9

Як видно з табл. 4.2, супутниковий аналіз площ кварталів загалом узгоджується з матеріалами лісовпорядкування. Різниця у визначенні загальної площі та незаліснених ділянок не перевищує 0,5–2,0 га (менше 3%), що підтверджує високу точність дистанційного зондування. Наприклад, квартал 5 за даними ДЗЗ має дещо меншу заліснену площу через виявлення додаткових 2,5 га вирубок (втрата лісу 5,2 га та часткове відновлення 2,8 га). Аналогічно, для кварталу 28 зафіксовано чистий приріст лісового покриву (нові насадження 2,4 га перевищують втрату 1,2 га), що може свідчити про успішне відновлення на місці колишніх галявин. Найменші зміни спостерігаються в кварталах 26 і 3, розташованих у рекреаційній та заповідній зонах – тут втрати лісу за останні роки мінімальні (0,4–0,5 га).

Для детального аналізу стану насаджень у вибраних кварталах були використані як традиційні наземні лісопатологічні обстеження, так і супутникові дані. Наземна складова охоплює наявні в літературі оцінки санітарного стану деревостанів на постійних пробних площах парку, а дистанційна – спектральні індекси рослинності (насамперед NDVI) з мультиспектральних знімків Sentinel-2. Обидва типи даних було інтегровано у єдину ГІС-базу для спільного аналізу.

4.2. Наземна оцінка санітарного стану деревостанів парку

На першому етапі здійснено узагальнення результатів наземних санітарно-таксаційних обстежень, виконаних раніше в дубових лісах НПП «Цуманська пуца». Зокрема, використано дані детального лісопатологічного обстеження Герасимчук Г.В. 14 постійних пробних площ, закладених у різних лісництвах парку у 2022 р. (переважно у середньовікових та пристиглих дубяках) [25, 26].

За результатами цих обстежень середній індекс санітарного стану (I_C) дубових деревостанів парку становив 1,59–2,54 од. Це відповідає ослабленому санітарному стану насаджень за прийнятою шкалою (I_C від 1,51 до 2,50 – ослаблені; понад 2,51 – сильно ослаблені деревостани). Для більшості пробних площ I_C не перевищував 2,5, тобто насадження класифіковано як ослаблені; випадки сильно ослаблених деревостанів були поодинокі (наприклад, на ділянках з високою часткою сухоостою або значною дефоліацією крон). Максимальне зафіксоване значення $I_C = 2,54$ од. свідчить про наближення стану окремих деревостанів до критичної межі між ослабленням і початком всихання. Мінімальне значення $I_C = 1,59$ од., навпаки, характерне для ділянок з добрим станом крон і відсутністю значних пошкоджень, хоч і воно перевищує поріг абсолютно здорового насадження ($I_C = 1,0–1,5$).

За ступенем втрати асиміляційного апарату (дефоліації крон) дубові насадження парку оцінено як середнього пошкодження. Середня дефоліація становила 30–45% для дерев дуба звичайного, місцями досягала 50–59%. Такий рівень дефоліації відповідає помірному пошкодженню крон (II–III категорія ослаблення за дефоліацією) і підтверджує ослаблений стан деревостанів. Для інших порід у складі мішаних насаджень (сосни, граба, берези, ялини тощо) втрати листя були меншими – зазвичай 15–30%, що відповідає слабо пошкодженим кронам.

Важливим індикатором санітарного стану є наявність сухостійних дерев та осередків хвороб. Під час обстежень у всіх досліджених дубняках виявлено накопичення патологічного відпаду – поодинокі стовбури сухоостою дуба V–VI категорій санітарного стану [25, 26]. Частка таких дерев (мертві стоячі дерева останніх стадій) невелика – як правило, 1–2% від складу насадження, максимум до 4% на окремих ділянках.

Серед інфекційних хвороб, що вражають дубові насадження парку, домінують грибні патогени [25, 26]. За даними обстежень, від 4% до 14% дерев дуба на різних ділянках уражені збудниками хвороб [25, 26]. Найпоширенішими виявились такі захворювання: опеньок осінній (*Armillaria mellea*), несправжній

дубовий трутовик (*Phellinus robustus*), печіночниця звичайна (*Fistulina hepatica*), а також усихання гілок і пагонів дуба (грибні некрози). Наприклад, опеньком осіннім уражено до 10–14% обстежених дерев на окремих пробних площах [25, 26]. Окремо фіксувалися випадки бактеріозу дуба і розвиток ракових захворювань на стовбурах (збудник *Nectria galligena* – поперечний рак гілок) на деревах IV категорії стану і нижче, поодинокі свіжі вітровали та буреломи, пошкодження стовбурів в прикореневій зоні, що додатково послаблює стійкість деревостанів [25, 26].

У цілому результати наземних досліджень свідчать, що середньовікові та стиглі дубові ліси НПП «Цуманська пуца» на даному етапі ослаблені, хоча рівень їх пошкодження шкідливими організмами поки що низький [25, 26]. Дереву демонструють зниження біологічної стійкості під впливом комплексу негативних чинників – кліматичних змін, антропогенних навантажень, періодичних спалахів комах-фітофагів і поширення інфекційних хвороб. Вітровий та сніголамний фактори теж роблять внесок у ослаблення насаджень.

4.3. Супутниковий аналіз: вегетаційний індекс NDVI та визначення стану насаджень

Для дистанційної оцінки стану лісів було обрано нормалізований різницевий вегетаційний індекс NDVI – один з базових спектральних показників стану рослинності. NDVI характеризує інтенсивність фотосинтетично активної біомаси, тобто «зеленість» покриву, через співвідношення відбиття у ближньому інфрачервоному та червоному діапазонах спектра. Значення NDVI коливаються від -1 до $+1$, причому для густої здорової рослинності типові високі позитивні значення (близькі до $+1$), тоді як для зрідженого або пошкодженого покриву індекс помітно знижується. Відомо, що NDVI є чутливим до змін листової поверхні і пігментного складу листя, тому ослаблення та хвороби дерев (дефоліація, пожовтіння крон, суховерхість) проявляються як зниження NDVI на знімках. Ця властивість індексу давно використовується для моніторингу лісів: за динамікою NDVI можна виявляти осередки комах-дефоліаторів, наслідки

засух та інших стресів, особливо при аналізі багаторічних рядів даних. В нашому дослідженні NDVI застосовано для оцінки стану всіх виділів вибраних кварталів з метою виявлення ділянок, які потенційно відповідають різним класам санітарного стану.

Аналіз супутникових знімків Sentinel-2 проводився за літній період (червень–серпень) 2022–2023 рр., коли листяний покрив максимально розвинений і значення NDVI найвищі. Використано знімки рівня L2A (поверхнева відбивна здатність) з хмарністю не більше 10% над територією парку. Первинна обробка даних включала маскування хмар і їх тіней, приведення всіх спектральних каналів до просторової роздільної здатності 10 м, вирізання фрагмента з межами НПП та радіометричне корегування яскравості. Для кожного пікселя в межах лісового фонду парку обчислено NDVI за формулою:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (4.1)$$

Далі за допомогою інструментарію QGIS розраховано середні та медіанні значення NDVI для кожного виділу (лісової ділянки) у вибраних кварталах. Отримані значення NDVI були об'єднані в таблицю разом із наземними показниками (значеннями I_c , часткою пошкоджених дерев тощо) для тих самих виділів.

На основі спільної бази наземних і супутникових даних виконано кореляційний аналіз між індексом I_c та NDVI (рис. 4.3).

Нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI) є інтегральним показником «зеленості» та фотосинтетично активної біомаси рослин, чутливим до втрати листя (дефоліації), пошкодження пологу, водного стресу і деградації лісової рослинності. У досліджуваних лісових виділах НПП «Цуманська пуща» значення NDVI знаходились у межах 0,60–0,85, тоді як розрахований індекс санітарного стану деревостанів (I_c) – у діапазоні 1,5–2,6. Вказаний інтервал індексу I_c відповідає ослабленому або сильно ослабленому стану насаджень за

відсутності абсолютно здорових ($I_c = 1,0-1,5$) ділянок у вибірці.

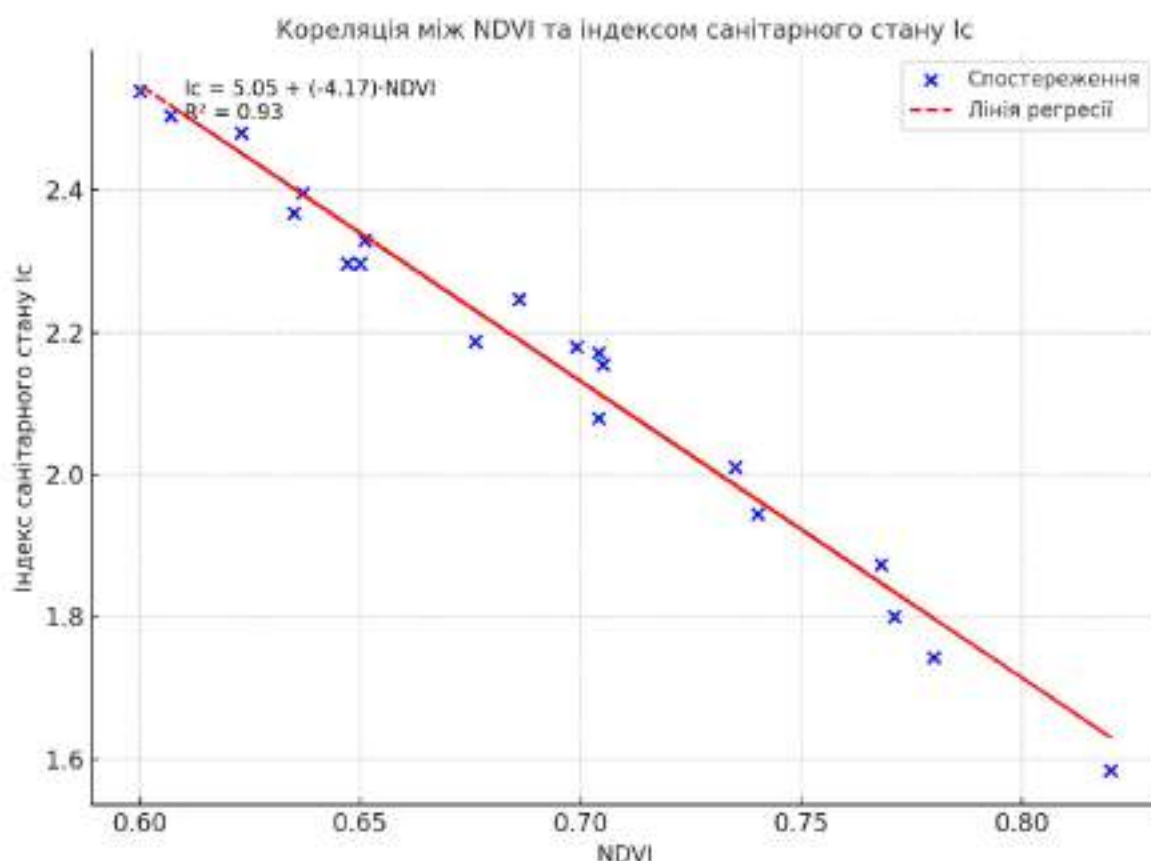


Рис. 4.3. Кореляційна залежність між NDVI та індексом санітарного стану (I_c) для лісових виділів НПП «Думанська пуща». Сині позначки відповідають окремим виділам, червоною пунктирною лінією показано лінійну регресію.

Спостерігається чітко виражений обернений зв'язок: виділи з вищим NDVI характеризуються нижчим (кращим) значенням індексу I_c , тоді як у насадженнях із гіршим станом (вищий I_c) фіксується менший NDVI. За результатами регресійного аналізу отримано рівняння лінії тренду:

$$I_c = 5,05 - 4,17 \cdot NDVI, \quad (4.2)$$

Рівняння (4.2) описує взаємозв'язок між показниками. Коефіцієнти регресії є статистично значущими ($p < 0,001$), а коефіцієнт $R^2 \approx 0,93$ свідчить, що приблизно 93% варіації індексу санітарного стану пояснюється зміною NDVI. Отриманий високий рівень кореляції узгоджується з результатами методики, що передбачає побудову моделі (2.4) та використання NDVI для оцінки стану лісів.

Загалом наведений аналіз підтверджує інформативність супутникового індексу NDVI щодо наземних оцінок санітарного стану. Виявлена стійка обернена залежність свідчить, що NDVI може слугувати надійним індикатором для виявлення ослаблених та сильно ослаблених насаджень. На основі моделі регресії можна визначити порогові значення NDVI, що відповідають різним класам санітарного стану лісів, і тим самим здійснити просторове картування стану насаджень парку (виділення зон здорових, ослаблених, всихаючих тощо). Важливо відзначити, що NDVI має певні обмеження: при високій густоті листового покриву він досягає насичення і слабше розрізняє різницю між здоровими та помірно ослабленими деревостанами. Тому для підвищення точності моніторингу доцільно поєднувати NDVI з іншими спектральними показниками стану рослинності – зокрема, індексами вологості (NDMI), ушкодження крон (наприклад, NBR) тощо, які доповнюють інформацію про стан лісових насаджень.

Порогові значення NDVI дозволяють екстраполювати результати наземної оцінки на всю територію парку, включно з кварталами і виділами, де детальні обстеження не проводились. На основі класифікованого растру NDVI (де кожному пікселю присвоєно клас стану) сформовано серію карт санітарного стану лісів НПП «Думанська пуща» у ГІС з візуалізацією зон різного рівня ослаблення.

У табл. 4.3 узагальнено отримані середні значення NDVI для вибраних кварталів та відповідні їм оцінки санітарного стану насаджень. Видно, що навіть в межах 4 кварталів показники NDVI дещо різняться, відбиваючи просторову неоднорідність стану лісів. Найвищий середній NDVI 0,78 характерний для кварталу 28 Партизанського лісництва – це рекреаційна зона. Натомість квартал 5 (господарська зона) має найнижчий NDVI 0,62, що відповідає більшому ослабленню. Кwartали 3 (заповідна зона) і 26 (зона регульованої рекреації) займають проміжне положення (NDVI 0,70–0,74), що характеризує помірне ослабленням насаджень на цих ділянках.

Таблиця 4.3 – Середні значення NDVI та класи санітарного стану лісів у вибраних кварталах

Квартал (лісництво)	Індекс стану I_c (оцінка наземна)	Середній NDVI	Клас санітарного стану за I_c	Клас санітарного стану за NDVI
5 (Сильненське)	2,6	0,62	сильно ослаблені	сильно ослаблені (на межі всихання)
28 (Партизанське)	1,6	0,78	ослаблені	здорові насадження
26 (Ківерцівське)	2,0	0,70	ослаблені	ослаблені
3 (Берестянське)	1,8	0,74	ослаблені	ослаблені

Примітка: Наведені значення I_c та NDVI є орієнтовними, оскільки наземні оцінки проводились на пробних площах. Класи стану за I_c визначено згідно табл. 2.3, а класи за NDVI – згідно порогів, отриманих за регресійною моделлю. (4.2).

Як видно з табл. 4.3, дистанційна оцінка (NDVI) загалом узгоджується з наземною класифікацією санітарного стану досліджених кварталів. Усі квартали, що наземно віднесені до ослаблених, мають середній NDVI у діапазоні приблизно 0,7–0,8, що відповідає тому ж класу (ослаблені насадження). Квартал 5, де зафіксовано найгірший стан, показав найнижчий NDVI 0,62 – за розрахованою шкалою це нижня межа сильно ослабленого стану, близька до класу всихаючих насаджень. Водночас квартал 28 із NDVI 0,78 межує з відноситься до здорових насаджень. Різниця між оцінками I_c і NDVI для кварталу 28 мінімальна (I_c 1,6 проти очікуваного для здорових менше 1,5). Загалом, статистичний аналіз підтвердив високий ступінь кореляції між показниками I_c та NDVI по виділах (коефіцієнт кореляції $r = -0,85$). Це досить високий показник, який свідчить про перспективність використання NDVI для моніторингу санітарного стану лісів парку.

Комплексний аналіз, що поєднав дані наземних спостережень з результатами дистанційного зондування, підтвердив їхню взаємну узгодженість та виявив додаткові можливості для оперативного моніторингу лісів. Наземні обстеження надають детальну інформацію про характер пошкоджень, виділяють причини ослаблення (хвороби, шкідники, абіотичні фактори) і дозволяють прямо розрахувати індекс стану. Супутникові ж дані дозволяють екстраполювати ці точкові виміри на всю територію парку та відстежувати зміни в часі фактично безперервно.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Огляд підходів до оцінювання санітарного стану (за опрацьованими джерелами, поданими в роботі) показує, що для узагальнення результатів наземних лісопатологічних обстежень застосовують інтегральні показники, зокрема індекс санітарного стану (I_c), який розраховують на основі категорій життєвості.

2. Згідно наявних літературних даних та методичних рекомендацій шкала інтерпретації I_c наступна: 1,00–1,50 — здорові, 1,51–2,50 — ослаблені, 2,51–3,50 — сильно ослаблені, 3,51–4,50 — всихаючі, 4,51–6,00 — мертві (сухостійні) насадження. Зазначені класи надалі використано як цільові категорії при аналізі супутникових індексів.

3. За опублікованими результатами наземних обстежень, наведеними у [25; 26], на 14 постійних пробних площ (2022 р.) встановлено, що середній I_c дубових деревостанів НПП становив 1,59–2,54 од., тобто переважно відповідав ослабленому стану; зафіксований максимум $I_c=2,54$ од. характеризує наближення окремих ділянок до межі між ослабленням і початком всихання.

4. За матеріалами тих самих наземних обстежень (джерела [25; 26]) показано, що санітарні симптоми ослаблення підтверджуються дефоліацією: для дуба середня дефоліація становила 30–45%, місцями досягала 50–59%, тоді як для інших порід у мішаних насадженнях — здебільшого 15–30%.

5. За матеріалами лісовпорядкування встановлено, що на території НПП переважають високобонітетні насадження: клас I – 10647,1 га (38,54%), клас II – 8962,6 га (32,44%), клас Ia – 5057,4 га (18,31%); нижчі класи представлені незначно (зокрема Ib – 462,8 га (1,68%), V – 0,5 га (0,01%)). Сукупно понад 89% площі вкритих лісовою рослинністю ділянок припадає на класи Ia–II.

6. За даними лісовпорядкування, проаналізованими в роботі, структура насаджень НПП за повнотою характеризується переважанням оптимально зімкнених деревостанів: найбільшу площу займає повнота 0,7 – 12617,6 га, суттєва частка припадає на 0,8 – 6778,6 га; частка низької повноти 0,3 – 105,6 га, а максимальної 1,0 – 49,3 га.

7. За результатами власних розрахунків NDVI та виконаного статистичного аналізу в роботі встановлено, що показники I_C і NDVI по виділах мають високий обернений зв'язок, що підтверджує інформативність NDVI для задач моніторингу стану насаджень у межах парку.

8. За результатами дистанційного аналізу показано, що найгірший стан серед розглянутих кварталів мав кв. 5 із NDVI = 0,62 (у тексті інтерпретовано як нижня межа сильно ослабленого стану), тоді як для кв. 28 отримано NDVI = 0,78; загалом зроблено висновок про узгодженість наземних і супутникових оцінок та можливість екстраполяції точкових наземних даних на територію НПП засобами ДЗЗ і ГІС.

Рекомендації

9. Доцільно впровадити для НПП регулярний супутниковий моніторинг у вегетаційний період із розрахунком NDVI та формуванням переліку «проблемних» ділянок за мінімальними значеннями індексу (з урахуванням отриманих у роботі значень для кварталів, зокрема NDVI = 0,62 як індикатора найгіршого стану серед проаналізованих кварталів).

10. Рекомендується поєднувати супутниковий моніторинг із наземним обстеженням ділянок.

11. Для підвищення відтворюваності та практичного використання результатів доцільно створити єдину геобазу для НПП, де поєднуються матеріали лісовпорядкування, контури виділів та кварталів і шари супутникових індексів, щоб забезпечити швидке оновлення карт санітарного стану та його оцінку

12. У подальших роботах доцільно розширити аналіз за рахунок часових рядів Sentinel-2 (не один період, а кілька сезонів/років) для відстеження динаміки стану, з перевіркою стабільності встановленого у роботі зв'язку між I_C і NDVI.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гриневич В. В. Методичні підходи до оцінки санітарного стану лісів НПП «Цуманська пуща» із використанням даних дистанційного зондування Землі / В. В. Гриневич, О. П. Герасимчук // Студентський науковий вісник = Student Scientific Bulletin = Studencki Biuletyn Naukowy : наук. зб. – Вип. 54. – Луцьк : ЛНТУ, 2025.
2. Про затвердження Санітарних правил в лісах України : Постанова Кабінету Міністрів України від 27.07.1995 № 555 (в ред. постанови КМУ від 26.10.2016 № 756). – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-95-%D0%BF>.
3. Мельник В. В. Оцінювання санітарного стану соснових насаджень зони безумовного відселення у свіжих борах лісів Українського Полісся / V. V. Melnyk // Scientific Bulletin of UNFU. – 2019. – Vol. 29, No. 3. – P. 39–43. – DOI: 10.15421/40290308.
4. Lausch A., Erasmi S., King D. J., Magdon P., Heurich M. Understanding Forest Health with Remote Sensing – Part I: A Review of Spectral Traits, Processes and Remote-Sensing Characteristics // Remote Sensing. – 2016. – Vol. 8, 1029. – DOI: 10.3390/rs8121029.
5. Borodavka V. O., Borodavka O. B., Getmanchuk A. I. та ін. The modern phytosanitary condition of pinewood forests in West Polissya and their large-scale withering: Analytical reference // Ukrainian Journal of Forest and Wood Science. – 2017. – Iss. 266. – P. 126–138.
6. Dynamics of the sanitary condition of Scots pine stands in the green zone of Kyiv based on the example of the Sviatoshyn Communal Forest-Park Enterprise // (матеріали статті, розміщені на платформі ResearchGate). – Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/396108882>.
7. Мешкова В. Л., Зінченко О. В. Заселеність стовбуровими комахами соснових насаджень, ослаблених різними чинниками // Вісник Харківського

національного аграрного університету ім. В. В. Докучаєва. – 2013. – Вип. 10. – С. 129–134.

8. Методичні вказівки з нагляду, обліку та прогнозування поширення шкідників і хвороб лісу для рівнинної частини України / В. Л. Мешкова, О. М. Кукіна, Ю. Є. Скрильник та ін. Харків, 2019. 90 с. URL: <https://forest.gov.ua/storage/app/sites/8/perelik-dokumentiv-shcho-shvaleni-naukovo-tehnichnoyu-radoyu/t5-method-naglyad-oblik-prognoz.pdf>

9. Gentilesca T., Camarero J. J., Colangelo M., Ripullone F. Drought-induced oak decline in the western Mediterranean region: an overview on current evidences, mechanisms and management options to improve forest resilience // *iForest – Biogeosciences and Forestry*. – 2017. – Vol. 10. – P. 796–806. – DOI: 10.3832/ifor2317-010.

10. Vyshenskyi O. M., Turko V. I. Spread and harmfulness of infectious diseases of the main forest-forming tree species in Zhytomyr Polissya forests // *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*. – 2018. – No. 8(1). – P. 85–99. – DOI: 10.15421/40280110.

11. Lausch A., Erasmi S., King D. J., Magdon P., Heurich M. Understanding Forest Health with Remote Sensing – Part II: A Review of Approaches and Data Models // *Remote Sensing*. – 2017. – Vol. 9, No. 2. – Art. 129. – DOI: 10.3390/rs9020129.

12. Іванько І. А., Голобородько К. К., Дідур О. О. та ін. Оцінка життєвості та санітарного стану деревних насаджень лісового заказника державного значення «Грушеватський» (Дніпропетровська область, Україна). *Вісник Уманського національного університету садівництва*. 2023. № 1. С. 66–76. <https://doi.org/10.32782/2310-0478-2023-1-66-76>.

13. Романчук Л. Д., Діденко П. В. Санітарний стан соснових насаджень Полісся Житомирщини. *Агробіологія*. 2022. № 2. С. 130–136. <https://doi.org/10.33245/2310-9270-2022-174-2-130-136>.

14. Drechsel J., Forkel M. Remote sensing forest health assessment – a comprehensive literature review on a European level. *Central European Forestry Journal*. 2025. Vol. 71, No. 1. P. 14–39. DOI: 10.2478/forj-2024-0022.
15. Rahimzadeh-Bajgiran P., Weiskittel A., Kneeshaw D., MacLean D. Detection of annual spruce budworm defoliation and severity classification using Landsat imagery. *Forests*. 2018. Vol. 9, No. 6. Article 357. DOI: 10.3390/f9060357.
16. Molnár T., Bolla B., Szabó O., Koltay A. Sentinel-2-Based Forest Health Survey of ICP Forests Level I and II Plots in Hungary. *Journal of Imaging*. 2025. Vol. 11, No. 11. Article 413. DOI: 10.3390/jimaging11110413.
17. Myroniuk V., et al. Nationwide remote sensing framework for forest resource assessment in war-affected Ukraine. *Forest Ecology and Management*. 2024. Vol. 569. Article 122156. DOI: 10.1016/j.foreco.2024.122156.
18. Strashok O., Ziemiańska M., Strashok V. Evaluation and Correlation of Normalized Vegetation Index and Moisture Index in Kyiv (2017–2021). *Journal of Ecological Engineering*. 2022. Vol. 23, No. 9. P. 212–218. DOI: 10.12911/22998993/151884.
19. Banskota A., Kayastha N., Falkowski M. J., Wulder M. A., Froese R. E., White J. C. Forest monitoring using Landsat time series data: A review. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 2014. Vol. 40, No. 5. P. 362–384. DOI: 10.1080/07038992.2014.987376.
20. Chaves M. E. D., Picoli M. C. A., Sanches I. D. Recent Applications of Landsat 8/OLI and Sentinel-2/MSI for Land Use and Land Cover Mapping: A Systematic Review. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No. 18. Article 3062. DOI: 10.3390/rs12183062.
21. Martinez A. de la I., Labib S. M. Demystifying normalized difference vegetation index (NDVI) for greenness exposure assessments and policy interventions in urban greening. *Environmental Research*. 2023. Vol. 220. 115155. DOI: 10.1016/j.envres.2022.115155.

22. Rahimzadeh-Bajgiran P., Weiskittel A. R., Kneeshaw D., MacLean D. A. Detection of annual spruce budworm defoliation and severity classification using Landsat imagery. *Forests*, 2018. Vol. 9, No. 6. 357. DOI: 10.3390/f9060357. [MDPI](https://doi.org/10.3390/f9060357)

23. Koch T. L., Hobi M. L., Morsdorf F. та ін. Assessing intraspecific variation of tree species based on Sentinel-2 vegetation indices across space and time. *Remote Sensing*, 2025. Vol. 17, No. 12. 2094. DOI: 10.3390/rs17122094. orcid.org

24. Eitel J. U. H., Griffin K. L., Boelman N. T. та ін. Broadband, red-edge information from satellites improves early stress detection in a New Mexico conifer woodland. *Remote Sensing of Environment*, 2011. Vol. 115. P. 3640–3646. [research.fs.usda.gov](https://www.research.fs.usda.gov/)

25. Герасимчук Г. В., Мазепа В. Г. Санітарний стан дубових деревостанів Ківерцівського національного природного парку «Цуманська пуща». У: *Синергія освіти, науки, виробництва в умовах глобальних викликів сьогодення: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф.* (Луцьк, 29 берез. 2023 р.). – Луцьк: ЛНТУ, 2023. – С. 53–56. – URL: <https://dspace.pdau.edu.ua/server/api/core/bitstreams/a63939d8-fbe6-4591-a570-2703d81557da/content> (дата звернення: 17.11.2025).

26. Герасимчук Г. В. Санітарний стан дубових деревостанів Ківерцівського національного природного парку «Цуманська пуща» // *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія: Сільськогосподарські науки.* – 2025. – Вип. 2(110). – С. 31–47. – DOI: 10.31713/vs220253.

27. Літопис природи Ківерцівського НПП «Цуманська пуща». Т. 8. Ківерці, 2023.

28. Ківерцівський національний природний парк «Цуманська пуща» // *Wow Nature*. URL: <https://wownature.in.ua/parky-i-zapovidnyky/kivertsivskyy-natsionalnyy-pryrodnyy-park-tsumanska-pushcha/> (дата звернення: 07.12.2025).

29. Національний природний парк «Цуманська пуща» // *Туристичний портал Волині*. URL: <https://tourism.volyn.ua/place/18> (дата звернення: 07.12.2025).

30. Climate Report – Lutsk (Ukraine): comprehensive climate analysis 1970–2024. StatsClimat, 2025. URL: https://statsclimat.com/Europe/Ukraine/report_Lutsk?utm_source=chatgpt.com

31. Коротка інформація про Луцьку міську територіальну громаду, розташування, клімат. Офіційний сайт Луцької міської ради. URL: https://www.lutskrada.gov.ua/pages/korotka-informatsiia-pro-lutsku-misku-terytorialnu-hromadu-roztashuvannia-klimat?utm_source=chatgpt.com

32. Путилівка. Регіональний офіс водних ресурсів у Волинській області. URL: https://vodres.gov.ua/node/1281?utm_source=chatgpt.com

33. Опублікували фото річок, які протікають «Цуманською пущею». Інформаційний портал «Район.Еко», 07.02.2022. URL: https://eco.rayon.in.ua/news/483036-opublikovali-foto-richok-yaki-protikayut-tsumanskoyu-pushcheyu?utm_source=chatgpt.com

34. Мазепа В.Г., Турко В.М. Регіональне лісівництво: підручник. Житомир: Кваліфікаційна робота: методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти освітньої програми «Лісове господарство» галузі знань 20 Аграрні науки та продовольство спеціальності 205 Лісове господарство денної та заочної форм навчання. Уклад.: В.Г. Мазепа, В.О. Волянський, О.П. Герасимчук. Луцьк: ЛНТУ, 2023. 24 с.

35. Лісотаксаційний довідник. Уклад.: А.М. Білоус, С.М. Кашпор, В.В. Миронок, В.А. Свінчук, О.М. Леснік. Київ: Видавничий дім «Вініченко», 2021. 424 с.

36. Основи лісогосподарювання: навчальний посібник. Уклад.: С.І. Миклуш, Ю.М. Дебринюк, М.В.Я. Заячук та ін. Львів: Галицька видавнича спілка, 2022. 830 с.

37. Кваліфікаційна робота: методичні вказівки до оформлення кваліфікаційних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівнів вищої освіти всіх освітніх програм денної та заочної форм навчання. Уклад.: Н.В. Ковальчук, Ю.Г. Фесіна, І.Л. Заблоцька. Луцьк: ЛНТУ, 2023. 46 с.

38. Кваліфікаційна робота. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти освітньої програми «Лісове господарство» галузі знань 20 Аграрні науки та продовольство спеціальності 205 Лісове господарство денної та заочної форм навчання / уклад. В.Г. Мазепа, В.О. Волянський, О.П. Герасимчук. – Луцьк: ЛНТУ, 2023. – 24 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

УДК 630*2:528.8:004.9

Гриневич В.В., ст. гр. ЛГм-21

Науковий керівник: к.т.н., доц. Герасимчук О.П.

МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ САНІТАРНОГО СТАНУ ЛІСІВ НПП «ЦУМАНСЬКА ПУЩА» ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

У статті розглянуто методичні підходи до оцінювання санітарного стану лісових насаджень Ківерцівського національного природного парку «Цуманська пуща» на основі поєднання польових таксаційно-санітарних обстежень та даних дистанційного зондування Землі. Обґрунтовано послідовність робіт, що включає: збір і систематизацію матеріалів лісовпорядкування та санітарних обстежень; класифікацію насаджень за категоріями санітарного стану; відбір та передобробку мультиспектральних супутникових знімків; розрахунок вегетаційних індексів (насамперед NDVI) і їх просторовий аналіз у межах виділів; порівняння індексних показників із результатами наземної оцінки. Запропоновано схему інтеграції наземних і супутникових даних у середовищі ГІС для побудови серії тематичних карт санітарного стану лісів, що відображають просторову диференціацію здорових, ослаблених і пошкоджених насаджень. Запропоновані методичні підходи можуть бути використані як основа для створення оперативної системи моніторингу санітарного стану лісів НПП «Цуманська пуща» та інших лісових територій.

Ключові слова: санітарний стан лісів, НПП «Цуманська пуща», дистанційне зондування Землі, NDVI, вегетаційні індекси, ГІС-картографування, моніторинг.

Груневич В.

METHODOLOGICAL APPROACHES TO ASSESSING THE SANITARY STATE OF FORESTS IN THE KIVERTSI NATIONAL NATURE PARK “TSUMANSKA PUSHCHA” USING EARTH REMOTE SENSING DATA

The article presents methodological approaches to assessing the sanitary state of forest stands in the Kivertsi National Nature Park “Tsumanska Pushcha” based on the integration of ground-based sanitary surveys and Earth remote sensing data. The workflow includes collection and harmonization of forest inventory and sanitary inspection materials, classification of stands into sanitary condition categories, selection and preprocessing of multispectral satellite images, calculation of vegetation indices (primarily NDVI) and their spatial analysis within forest compartments, as well as comparison of index values with field-based sanitary assessments. A GIS-based scheme for integrating ground and satellite data is proposed in order to produce a set of thematic maps of forest sanitary state that reflect the spatial differentiation between healthy, weakened and damaged stands. The proposed methodological approaches can serve as a basis for developing an operational monitoring system for the sanitary state of forests in the “Tsumanska Pushcha” National Nature Park and other forest areas.

Keywords: forest sanitary state, “Tsumanska Pushcha” National Nature Park, Earth remote sensing, NDVI, vegetation indices, GIS mapping, monitoring.

Постановка проблеми. Санітарний стан лісів є одним із ключових показників їхньої стійкості, екологічної й господарської цінності. Погіршення санітарного стану насаджень під впливом комплексу чинників – зміни клімату, посух, ослаблення деревостанів, масового розмноження шкідників і патогенів, зростання рекреаційного та техногенного навантаження – призводить до втрати

деревини, зниження біорізноманіття та погіршення виконання лісами захисних і природоохоронних функцій [1; 4]. В українському законодавстві та відомчих регламентах (санітарні правила, методичні рекомендації, документи з національної інвентаризації лісів) санітарна оцінка насаджень розглядається як необхідна передумова прийняття рішень щодо проведення санітарно-оздоровчих заходів, режиму користування та охорони лісів [13–15]. Відтак удосконалення підходів до її здійснення є не лише науковою, а й важливою практичною задачею державної лісової політики.

Традиційно санітарний стан насаджень оцінюється переважно за результатами наземних таксаційно-санітарних обстежень, що виконуються вибірково, значною мірою залежать від суб'єктивного фактору й потребують значних трудових і часових витрат [1–4]. В умовах зростання площ лісів, які підлягають моніторингу, і посилення просторової неоднорідності впливів (локальні осередки шкідників, вибіркові вітровали, осередки усихання) такі підходи стають недостатньо ефективними. Світовий і вітчизняний досвід переконливо демонструє, що системи оцінювання й моніторингу санітарного стану лісів мають базуватися на поєднанні наземних спостережень з даними дистанційного зондування Землі, насамперед мультиспектральних супутникових знімків та похідних від них вегетаційних індексів [5–8; 10–12; 20].

Ківерцівський національний природний парк «Цуманська пуща» є однією з ключових лісових територій Волинського Полісся з високою природоохоронною цінністю, значною часткою стиглих і перестійних насаджень, комплексом рідкісних та зникаючих видів флори і фауни [2; 3; 16–19]. Водночас саме тут гостро проявляються проблеми ослаблення окремих категорій насаджень, локального розвитку шкідників, дії вітровалів і інших антропогенних та природних чинників. Наявні публікації щодо лісів НПП «Цуманська пуща» переважно стосуються їх таксаційної, еколого-типологічної й природоохоронної характеристики та результатів класичної санітарної оцінки [2; 3; 4], тоді як питання систематичного використання супутникових даних для картографування санітарного стану розкриті фрагментарно або зовсім не висвітлені.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науковій літературі питання оцінювання стану лісових екосистем за даними дистанційного зондування Землі розробляється досить інтенсивно. Узагальнювальні огляди й окремі дослідження демонструють широкі можливості мультиспектральних супутникових даних для виявлення осередків ослаблення, усихання, вітровалів, наслідків пожеж і масового розмноження шкідників, а також для картографування просторової динаміки стану лісів у часі [5–8; 20]. Найчастіше як інтегральну характеристику стану деревостанів застосовують індекси рослинності (NDVI, EVI, NBR, індекси «червоного краю»), розраховані за даними супутників Sentinel-2, Landsat тощо, які чутливо реагують на зміни поверхні листків, ступінь дефоліації й водний стрес. Окремі роботи поєднують аналіз серій знімків із методами машинного навчання для автоматизованого виділення ділянок із відхиленням від «нормального» стану деревостанів [5–8].

У європейських і українських дослідженнях усе ширше застосовуються саме супутникові дані високої та середньої просторової роздільної здатності (Sentinel-2, Landsat-8/9) для моніторингу лісів у регіональному та національному масштабах [5–9; 11; 12]. Для умов України розробляються підходи до використання вегетаційних індексів і похідних статистичних показників для оцінювання впливу посух, визначення динаміки продуктивності деревостанів, виявлення ділянок із підвищеним ризиком деградації та для потреб національної інвентаризації лісів [9–12; 20]. Водночас у більшості робіт акцент зроблено на загальному «лісовому покриві» як об'єкті спостереження, без детальної прив'язки до прийнятої в лісовому господарстві системи санітарної класифікації насаджень.

Питання власне санітарного стану лісів традиційно розглядаються в контексті наземних таксаційно-санітарних обстежень, розроблення критеріїв віднесення деревостанів до певних категорій стану, оцінки впливу шкідників, хвороб і абіотичних чинників [1–4; 10; 13–15]. Для окремих регіонів і типів лісу запропоновано уточнені шкали оцінки індексу санітарного стану, підходи до виділення неблагополучних ділянок, рекомендації щодо планування санітарно-оздоровчих заходів [1–4; 10]. Однак у більшості таких робіт дистанційне зондування або взагалі не використовується, або відіграє допоміжну роль (орієнтування на місцевості, уточнення контурів насаджень), без формалізованого зв'язку між санітарними категоріями й значеннями супутникових індексів.

Щодо лісів НПП «Думанська пуща» вже наявні публікації, присвячені їх еколого-типологічній та таксаційній характеристиці, а також оцінці санітарного стану окремих категорій насаджень, насамперед дубових і соснових деревостанів [2–4; 11; 16–19]. Ці роботи дають цінну інформацію про структуру лісового фонду, вікову й породну мозаїку, особливості сучасного стану деревостанів і чинники їх ослаблення. Водночас питання систематичного використання супутникових даних для просторово деталізованого картографування санітарного стану лісів парку висвітлено фрагментарно: як правило, згадуються лише загальні можливості ДЗЗ і ГІС, без розроблення цілісної методики інтеграції наземних санітарних оцінок із вегетаційними індексами та без опису алгоритмів побудови карт санітарного стану.

Таким чином, попри наявність широкого спектра досліджень у галузі дистанційного моніторингу лісів і класичної санітарної оцінки насаджень, залишається недостатньо опрацьованим методичний аспект поєднання цих двох напрямів саме для природоохоронних територій Полісся, зокрема для НПП «Думанська пуща». Це обумовлює потребу в розробленні й апробації методичних підходів, які забезпечують формалізований зв'язок між категоріями санітарного стану деревостанів і супутниковими показниками, а також дозволяють створювати картографічні моделі санітарного стану, придатні для практичного використання в системі управління лісами парку.

Цілі статті. Метою статті є обґрунтування та апробація методичних підходів до оцінки й картографування санітарного стану лісів НПП «Думанська пуща» із використанням даних дистанційного зондування Землі. Для досягнення

цієї мети передбачено: розробити послідовність операцій з інтеграції наземних санітарних оцінок із супутниковими індексами рослинності.

Виклад основного матеріалу дослідження. Об'єктом дослідження є лісові насадження Ківерцівського національного природного парку «Цуманська пуща», розташованого в межах Волинського Полісся (рис. 1). Територія парку характеризується переважанням соснових, дубових та мішаних насаджень на дерново-підзолистих і лучно-болотних ґрунтах, розвиненою гідромережею та мозаїчністю лісорослинних умов, що зумовлює високу просторову неоднорідність санітарного стану деревостанів [11–13].

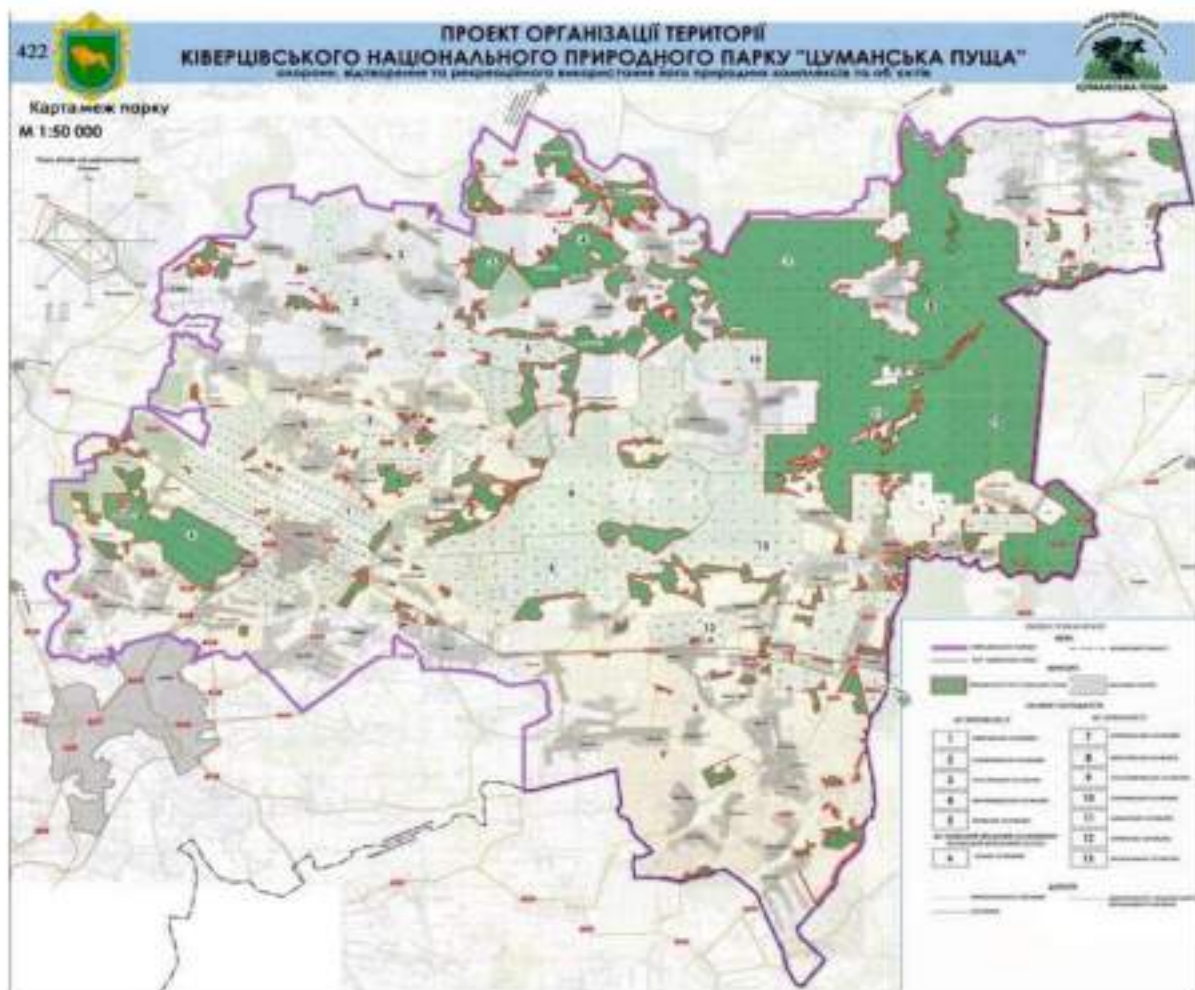


Рисунок 1 – Організація території ківерцівського НПП «Цуманська пуща»

Інформаційну базу досліджень склали: матеріали останнього лісовпорядкування, дані наземних санітарно-таксаційних обстежень, фондові дані адміністрації НПП «Цуманська пуща» щодо проведених санітарно-оздоровчих заходів, а також супутникові знімки Sentinel-2 рівня Level-2A (поверхнева відбивна здатність) за вегетаційний період останніх років із хмарністю менше 10–20 %. Для цифрового опису просторової структури насаджень і прив'язки наземних спостережень використовували матеріали державного лісового геопорталу «Ліси України» та національних відкритих картографічних сервісів [14; 15].

Наземні дані були зведені до єдиної бази в середовищі ГІС у вигляді полігонального шару виділів (рис. 2) із атрибутивною інформацією про склад, вік, повноту, бонітет, категорію захисності та попередню оцінку санітарного стану. Це забезпечило можливість інтегрувати польові спостереження з супутниковими показниками та проводити подальший просторовий аналіз.

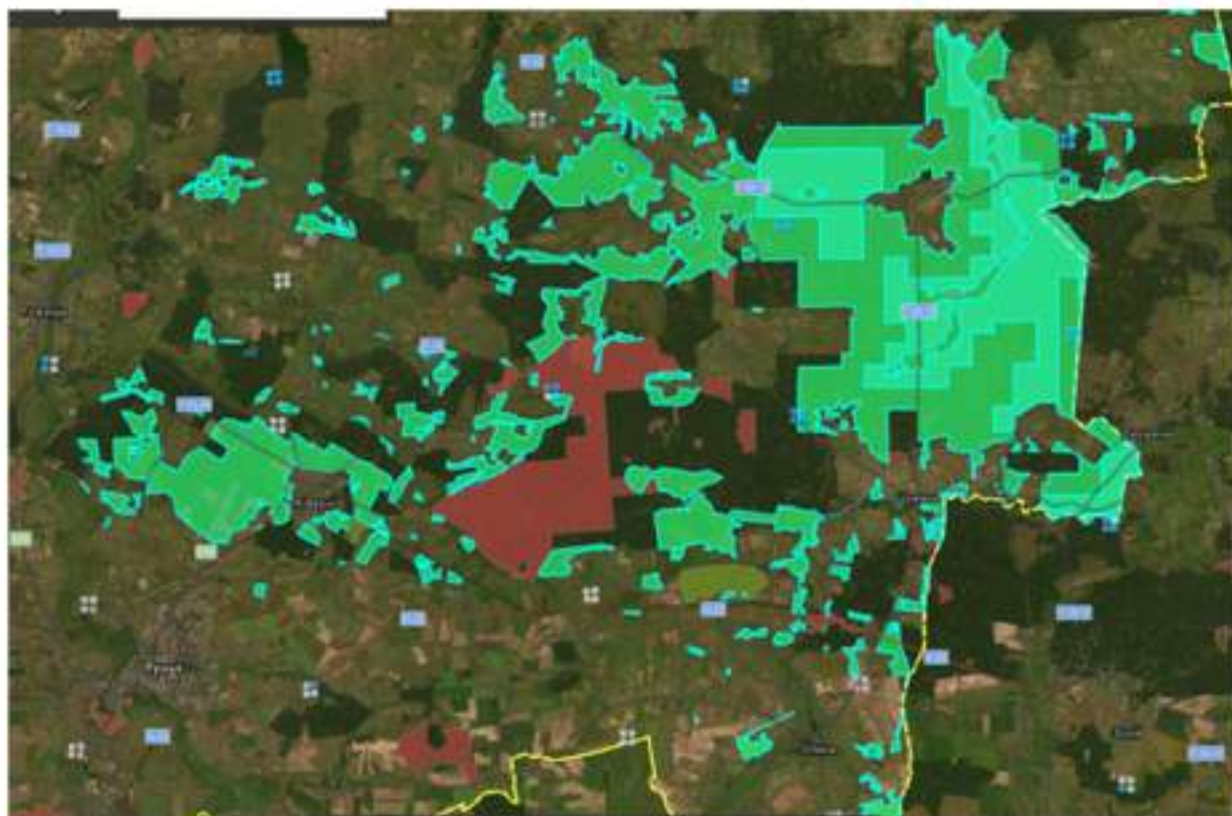


Рисунок 2 – Оцифрована картосхема парку

Оцінку санітарного стану деревостанів здійснювали за модифікованою шкалою категорій життєвого стану дерев, що передбачає виділення шести категорій: I – здорові; II – ослаблені; III – сильно ослаблені; IV – всихаючі; V – свіжий сухостій; VI – старий сухостій [1; 10]. Для кожної пробної площі підраховували кількість дерев за категоріями стану $n_1...n_6$.

Ступінь ушкодження деревостанів характеризується індексом стану деревостану I_c , який для чистих за породою насаджень визначали за формулою:

$$I_c = \frac{(k_1 \cdot n_1 + k_2 \cdot n_2 + \dots + k_6 \cdot n_6)}{N},$$

де I_c – індекс стану деревостану; $k_1...k_6$ – порядкові номери категорій стану (від I до VI), які приймаються як вагові коефіцієнти; $n_1...n_6$ – кількість дерев відповідної категорії стану на пробній площі; N – загальна кількість дерев на пробній площі.

Для змішаних деревостанів індекс стану обчислюється з урахуванням суми дерев різних порід однієї категорії стану за формулою:

$$I_c = \frac{(k_1 \cdot (n_{a1} + n_{b1} + n_{c1} + \dots)) + k_2 \cdot (n_{a2} + n_{b2} + n_{c2} + \dots) + \dots + k_n \cdot (n_{an} + n_{bn} + n_{cn} + \dots)}{N},$$

де $n_{a_i}, n_{b_i}, n_{c_i}$ – кількість дерев різних порід, що належать до i -тої категорії стану;
 Отримані значення індексу I_c інтерпретуються за шкалою санітарного стану деревостанів (табл. 1), що враховує не лише величину I_c , а й співвідносний рівень поточного середнього періодичного радіального приросту відносно контрольних (незашкоджених) насаджень [1; 10].

Таблиця 1 – Шкала оцінки санітарного стану деревостанів

Індекс стану деревостану I_c	Поточний середній періодичний радіальний приріст, % від контролю	Санітарний стан деревостану
1,00–1,50	≈100	Здоровий
1,51–2,50	71–100	Ослаблений
2,51–3,50	40–70	Сильно ослаблений
3,51–4,50	<40	Всихаючий
4,51–6,00	0	Мертвий (сухостійні насадження)

Розповсюдженість хвороб і заселеність насаджень ентомошкідниками у цілому оцінюється за часткою пошкоджених дерев, що розраховувалась за формулою:

$$P = \frac{n}{N} 100\%,$$

де P – розповсюдженість, %; n – кількість пошкоджених (уражених) дерев;
 N – загальна кількість обстежених дерев.

Отримані показники I_c та P для пробних площ і окремих виділів є «опорними» наземними даними для калібрування супутникових індексів і побудови карт санітарного стану.

На основі індексу I_c формуються класи санітарного стану насаджень (здорові, ослаблені, сильно ослаблені, всихаючі, мертві), які надалі використовувалися як тематичні категорії при класифікації супутникових зображень та формуванні легенди карт.

Для супутникового аналізу доцільно використовувати знімки Sentinel-2 (MSI) рівня оброблення Level-2A (поверхнева відбивна здатність), отримані в період максимальної поверхні листків (червень–серпень). Первинна обробка знімків включає маскування хмар і хмарних тіней за вбудованими масками якості, ресемплінг усіх спектральних каналів до просторової роздільної здатності 10 м, обрізання зображень у межах контуру парку та радіометричне нормування.

Базовим показником стану деревостанів обрано нормалізований вегетаційний індекс NDVI, який обчислювали за класичною формулою на основі червоного та ближнього інфрачервоного каналів Sentinel-2 [18–20]:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red},$$

де *NIR* – відбивна здатність у ближньому інфрачервоному діапазоні; *Red* – відбивна здатність у червоному діапазоні.

NDVI є інтегральним показником «зеленості» та фотосинтетично активної біомаси, чутливим до дефоліації, порушення цілісності намету, водного стресу й деградації лісової рослинності. Для кожного пікселя в межах лісових площ НПП «Цуманська пуша» потрібно отримати значення NDVI, після чого в середовищі QGIS виконати агрегування цих значень до рівня виділів.

За потреби, для більшої чутливості до змін у верхній частині спектру та слабких ослаблень деревостанів, методика може бути розширена за рахунок використання індексів «червоного краю» (Red Edge NDVI, NDRE), індексу вологовмісту (NDMI) та індексу burn ratio (NBR), однак у даній роботі базовим показником для апробації методичного підходу обрано NDVI як найбільш поширений і добре інтерпретований індекс [1; 5–8; 18–20].

Інтеграцію наземних санітарних оцінок деревостанів та супутникових даних слід здійснювати поетапно за такою схемою:

1. формування геобазису даних: завантаження полігонального шару виділів парку з атрибутивною інформацією лісовпорядкування та прив'язка пробних площ із розрахованими значеннями I_c і P ;
2. попередня обробка супутникових знімків Sentinel-2 (маскування хмар, нормування, обрізання за контуром досліджуваної території);
3. обчислення NDVI за формулою;
4. виконання зональної статистики (розрахунок середнього, медіанного та квартильних значень NDVI для кожного полігону виділу);
5. зведення наземних показників I_c і P та супутникових індексів NDVI у єдину таблицю для подальшого статистичного аналізу;
6. побудова регресійних і кореляційних залежностей між I_c і NDVI, визначення порогових значень NDVI для виділення класів санітарного стану;
7. класифікація лісових площ за класами санітарного стану на основі NDVI та, за потреби, інших індексів;
8. побудова серії тематичних карт санітарного стану деревостанів НПП «Цуманська пуша».

Для кількісного опису зв'язку NDVI та I_c застосовано просту лінійну регресійну модель:

$$I_c = a + b \cdot NDVI + \varepsilon$$

де a , b – параметри регресії, оцінені за методом найменших квадратів; ε – випадкова похибка.

Висновки. Запропонований методичний підхід, що поєднує наземні оцінки санітарного стану з аналізом супутникових індексів у середовищі ГІС, дозволяє одержати просторово суцільні карти санітарного стану лісів НПП «Цуманська пуща», оперативно виявляти потенційно неблагополучні ділянки та уточнювати пріоритети проведення санітарно-оздоровчих заходів. На відміну від суто наземних обстежень, такий підхід забезпечує значно вищу оперативність, масштабність і можливість ретроспективного аналізу динаміки стану лісів за багаторічними супутниковими серіями [1; 5–8; 10; 18–20].

Перелік джерел посилання

1. Мельник В. В. Оцінювання санітарного стану соснових насаджень зони безумовного відселення у свіжих борах лісів Українського Полісся. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. Т. 29, № 3. С. 39–43. DOI: 10.15421/40290308.
2. Герасимчук Г. В. Санітарний стан дубових деревостанів Ківерцівського національного природного парку «Цуманська пуща». *Вісник НУВГП. Сільське господарство та лісівництво*. 2025. УДК 630:644.2. DOI: 10.31713/vs220253.
3. Герасимчук Г. В., Мазепа В. Г. Санітарний стан дубових деревостанів Ківерцівського національного природного парку «Цуманська пуща». У: *Синергія освіти, науки, виробництва в умовах глобальних викликів сьогодення: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. (Луцьк, 29 березня 2023 р.)*. Луцьк: ЛНТУ, 2023. С. 53–56. URL: <https://dSPACE.pdau.edu.ua/server/api/core/bitstreams/a63939d8-fbe6-4591-a570-2703d81557da/content> (дата звернення: 17.11.2025).
4. Борисенко О. І., Мешкова В. Л. Прогнозування поширення пожеж та осередків шкідливих комах у соснових лісах засобами ГІС: монографія. Харків: Планета-Прінт, 2021. 148 с. URL: https://www.researchgate.net/publication/354648463_Borysenko_O_I_Meshkova_VL_Prediction_of_fires_and_insect_pests_foci_spread_in_the_pine_stands_by_means_of_GIS (дата звернення: 17.11.2025).
5. Drechsel P., Forkel M., Trotsiuk V. та ін. Remote sensing and forest health assessment: A literature review. *Central European Forestry Journal*. 2025. Vol. 71, No. 1. P. 14–39. DOI: 10.2478/forj-2025-0002.
6. Lausch A., Erasmi S., King D. J., Magdon P., Heurich M. Understanding forest health with remote sensing. Part II—A review of approaches and data models. *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9, No. 2. Art. 129. <https://doi.org/10.3390/rs9020129>
7. Molnár T., Keresztes B., Kovács T. та ін. Sentinel-2-Based Forest Health Survey of ICP Forests Level I and II Plots in Hungary. *Journal of Imaging*. 2025. Vol. 11, No. 11. 413. URL: <https://www.mdpi.com/2313-433X/11/11/413> (дата звернення: 70.11.2025).
8. Dalponte M., ... Canopy spectral responses of temperate forests to late-summer drought revealed by Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2025. Article ID 114395. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938525002903> (дата звернення: 17.11.2025).
9. Денис Ю., Бурштинська Х., Паштетник О. Моніторинг хвойних лісів з використанням даних дистанційного зондування. *Загальна географія та картографія* (онлайн-видання). Бл. 2018 р. <https://doi.org/10.33841/1819-1339-2019-1-37-78-84>.
10. Технології дистанційного зондування для використання в національних інвентаризаціях лісів. Аналітична записка SFI-Ukraine, 27.08.2024. URL: <https://www.sfi-ukraine.org.ua/tehnologiyi-dystancziynogo-zonduvannya-dlya-vykorystannya-v-nacjonalnyh-inventaryzacziyah-lisiv/> (дата звернення: 17.11.2025).

11. Миронюк Р. та ін. Інвентаризація лісів України на основі дистанційного зондування. Навчально-методичні матеріали літньої школи, Суми, 2023. 40 с. URL: <https://www.sfi-ukraine.org.ua/wp-content/uploads/2024/04/myroniuk-rs-inventory-sumy-august-2023-ukr.pdf> (дата звернення: 17.11.2025).
12. Національна інвентаризація лісів України. Офіційний сайт ВО «Укрдержліспроєкт». URL: <https://lisproekt.gov.ua/dijalnist/nacionalna-inventarizacija-lisiv> (дата звернення: 17.11.2025).
13. Санітарні правила в лісах України. Постанова Кабінету Міністрів України від 27.07.1995 № 555 (із змінами). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/555-95-%D0%BF> (дата звернення: 17.11.2025).
14. Про затвердження Порядку проведення національної інвентаризації лісів. Постанова Кабінету Міністрів України від 21.04.2021 № 392. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/392-2021-%D0%BF> (дата звернення: 17.11.2025).
15. Методичні рекомендації щодо оцінювання впливу зміни клімату на ліси, аналізу фіторізноманіття та екологічних режимів за даними моніторингу лісів. Схвалено Науково-технічною радою Держлісагентства України. URL: <https://forest.gov.ua/agentstvo/konsultativno-doradchi-organi/naukovo-tehnichna-rada/perelik-dokumentiv-shcho-shvaleni-naukovo-tehnichnovu-radoyu-derzhlisagentstva> (дата звернення: 17.11.2025).
16. Ківерцівський національний природний парк «Цуманська пуша». Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Національний_природний_парк_«Цуманська_пуша» (дата звернення: 17.11.2025).
17. Ківерцівський національний природний парк «Цуманська пуша». Wow Nature – туристичний портал. URL: <https://wownature.in.ua/season/kivertsivskyy-natsionalnyy-pryrodnyy-park-tsumanska-pushcha/> (дата звернення: 17.11.2025).
18. Ківерцівський національний природний парк «Цуманська пуша». Туристичний портал Волині VisitLutsk. URL: <https://www.visitlutsk.com/nacjonalnyj-pryrodnyj-park-czumanska-pushha/> (дата звернення: 17.11.2025).
19. Екологічний паспорт Волинської області за 2024 рік. Волинська ОДА. Луцьк, 2024. 100 с. URL: https://voladm.gov.ua/article/ekologichnij-pasport-volinskoyi-oblasti-za-2024-rik/?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 17.11.2025).
20. Використання геоінформаційних систем і штучного інтелекту для збереження лісів з високою природоохоронною цінністю України. WWF, 2022. 52 с. URL: <https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/gis-and-ai-for-preserving-high-conservation-value-forests-of-ukraine.pdf> (дата звернення: 17.11.2025).
21. Стан лісів та моніторинг в епоху дистанційного зондування. Новина УкрНДЛГА, 02.06.2025. URL: <https://uriffm.org.ua/uk/news/762> (дата звернення: 17.11.2025).

Додаток Б

Розподіл лісових ділянок лісокористувачів НПП за функціональними зонами

Користувачі лісовими ділянками	Заповідна зона		Зона регульованої рекреації		Зона стаціонарної рекреації		Господарська зона		Усього	
	га	%	га	%	га	%	Га	%	га	%
Парк	1471,8	16,16	34,2	1,76	54,2	85,76	435,24	2,37	1995,44	6,77
ДП «Ківерцівський лісгосп»	-	-	-	-	-	-	1891,0	10,29	1891,0	6,41
ДП «Цуманський лісгосп»	7374,5	80,98	1571,9	80,77	9,0	14,24	11780,16	64,11	20735,5	70,31
ДП «Волинський військовий лісгосп»	260,3	2,86	340,0	17,47	-	-	1147,1	6,24	1747,4	5,93
СПП «Дружба»	-	-	-	-	-	-	1017,1	5,54	1017,1	3,45
КП «Господарник»	-	-	-	-	-	-	188,1	1,02	188,1	0,64
СВК «Полісся»	-	-	-	-	-	-	949,9	5,17	949,9	3,22
ТзОВ «Сіаль»	-	-	-	-	-	-	269,6	1,47	269,6	0,91
СГВК «Муравищенський»	-	-	-	-	-	-	360,0	1,96	360,0	1,22
СПП «Довіра»	-	-	-	-	-	-	336,5	1,83	336,5	1,14
Усього	9106,6	100,0	1946,1	100,0	63,2	100,0	18374,7	100,0	29490,6	100,0

Додаток В

Визначення групи віку насаджень НПП в залежності від функціональної зони

Панівна порода	Вік стиглості	Тривалість класів віку	Групи віку					
			Молодняки		середньо-вікові	пристигли	стигли	перестійні
			I вікової групи	II вікової групи				
Функціональні зони: заповідна, регульованої та стаціонарної рекреації								
Сосна, Модрина	121	10	до 20	21-40	41-100	101-120	121-160	161 і вище
Ялина (похідна)	61	10	до 10	44136	21-40	41-60	61-100	101 і вище
Дуб насінневий III і вище бонітету, по-рослевий II і вище бонітету (дуб високоствобурний)	161	10	до 20	21-41	41-140	141-160	161-200	201 і вище
Дуб насінневий IV і нижче бонітету та порослевий III і нижче бонітету	91	10	до 10	11-20	21-80	81-90	91-110	111 і вище
Дуб червоний, Клен гостролистий, Ясен звичайний	91	10	до 20	21-40	41-70	71-90	91-130	131 і вище
Граб	71	10	до 10	11-20	21-60	61-70	71-90	91 і вище
Акація біла	36	5	до 5	6-10	11-30	31-35	36-45	46 і вище
Береза, вільха чорна	71	10	до 10	11-20	21-60	61-70	71-90	91 і вище
Осика	41	10	до 10	11-20	21-30	31-40	41-60	61 і вище
Липа	91	10	до 10	11-20	21-80	81-90	91-110	111 і вище
Тополя	36	5	до 5	6-10	11-30	31-35	36-45	46 і вище
Верби чагарникові	3	1	1			2	3-4	5 і вище
Функціональна зона – господарська								
Сосна, Модрина	101	10	до 20	21-40	41-80	81-100	101-140	141 і вище
Ялина (похідна)	61	10	до 10	44136	21-40	41-60	61-100	101 і вище
Дуб насінневий III і вище бонітету та порослевий II і вище бонітету (дуб високоствобурний)	131	10	до 20	21-40	41-110	111-130	131-170	171 і вище
Дуб насінневий IV і нижче бонітету та порослевий III і нижче бонітету	71	10	до 10	11-20	21-60	61-70	71-90	91 і вище
Дуб червоний, клен гостролистий, ясен звичайний	81	10	до 20	21-40	41-60	61-80	81-120	121 і вище
Граб	61	10	до 10	11-20	21-50	51-60	61-80	81 і вище
Акація біла	31	5	до 5	6-10	11-25	26-30	31-40	41 і вище
Береза, вільха чорна	61	10	до 10	11-20	21-50	51-60	61-80	81 і вище
Осика	41	10	до 10	11-20	21-30	31-40	41-60	61 і вище
Липа	81	10	до 10	11-20	21-70	71-80	81-100	101 і вище
Тополя	31	5	до 5	6-10	11-25	26-30	31-40	41 і вище
Верби чагарникові	3	1	1			2	3-4	5 і вище

Додаток Г

Розподіл вкритих лісових насаджень за класами бонітету та панівними породами

Панівна порода	Класи бонітету							Усього	В %%
	1 ^{бi} вище	1*	1	2	3	4	5		
Сосна звичайна	234,1	3655,3	5417,1	1610,3	331,6	59,5		11307,9	40,92
Ялина європейська	8,5	108,8	61,1	23,9	8,3			210,6	0,76
Модрина європейська	6,7	0,7		0,5				7,9	0,03
Дуб червоний	11,2	17,9	61,8	20,7	3,1			113	0,45
Дуб звичайний		59,3	1330,0	3390,1	927,6	38,4		5745,4	20,79
Граб звичайний				47,1	62,5			109,6	0,40
Ясен звичайний		33,1	37,2	4,4	14,0			88,7	0,32
Клен гостролистий			4,7	1,1				5,8	0,02
Акація біла	1,4		2,0	0,7	0,6			4,7	0,02
Береза повисла	80,0	544,3	1038,8	554,6	97,5	34,2		2349,4	8,50
Осика	1,0	31,5	41,9	49,1	5,1	4,7		133,3	0,48
Вільха чорна	121,3	606,0	2643,8	3247,2	803,6	86,1	0,5	7508,5	27,17
Липа дрібнолиста		0,5	9,0	8,9	1,6	2,3		22,3	0,08
Тополя біла						4,6		4,6	0,02
Тополя чорна				3,3	5,9	1,6		10,8	0,04
Верба козача				0,7		0,4		1,1	
Разом	462,8	5057,4	10647,1	8962,6	2261,4	231,8	0,5	27623,6	100,00
<i>В %%</i>	1,68	18,31	38,54	32,44	8,19	0,84		100,00	

Додаток Д

Розподіл вкритих лісових насаджень за повнотою і панівними породами

Панівна порода	Повнота								Усього
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
Разом по Парку									
Сосна звичайна	15,0	42,2	252,9	1124,0	4763,4	3447,0	1634,2	29,2	11307,9
Ялина європейська		1,6	4,5	40,4	89,6	60,5	14,0		210,6
Модрина європейська				1,1	4,7	2,1			7,9
Дуб червоний				21,4	37,7	31,4	24,2		114,7
Дуб звичайний	10,6	95,9	317,2	946,9	2471,0	1407,8	487,9	8,1	5745,4
Граб звичайний		2,0		33,7	36,7	34,5	2,7		109,6
Ясен звичайний			1,9	5,5	60,0	12,5	7,8	1,0	88,7
Клен гостролистий			4,3		0,4	1,1			5,8
Акація біла			0,3	0,6	1,3	0,6	0,2		3
Береза повисла	4,9	20,7	100,7	371,1	1322,7	470,5	58,8		2349,4
Осика	5,1		4,7	41,3	43,4	31,8	7,0		133,3
Вільха чорна	69,5	115,5	496,5	1560,1	3765,7	1273,0	217,2	11,0	7508,5
Липа дрібнолиста			0,5		16,7	5,1			22,3
Тополя біла			4,6						4,6
Тополя чорна	0,5		4,8	1,2	4,3				10,8
Верба козача						0,7	0,4		1,1
Разом	105,6	277,9	1192,9	4147,3	12617,6	6778,6	2454,4	49,3	27623,6
В %%	0,38	1,01	4,32	15,01	45,67	24,55	8,88	0,18	100,00

Додаток Е

Загальна площа лісових культур НПП, га

Панівна порода	Загальна площа насаджень	З них - лісові культури						
		Загалом		за віковими групами, років				
		га	%	до 10	11-20	21-30	31-40	41-50
Сосна звичайна	11307,9	7806	69,03	465	702,4	488,9	337,5	1161,7
Ялина європейська	210,6	172,9	82,10	3,9	21,0	20,0	0,8	53,7
Модрина європейська	7,9	7,9	100,00	0,5				7,4
Дуб червоний	123,4	123,4	100,00	21,9	12,3	45,9	38,1	5,2
Дуб звичайний	5745,4	3072,2	53,47	212,0	725,9	721	508,4	547,9
Гراب звичайний	109,6							
Ясен звичайний	88,7	30,6	34,50	2,8	10,4		1,9	9,2
Клен гостролистий	5,8	5,8	100,00		1,1			4,7
Акація біла	4,7	3,5	74,47	0,3			3,2	
Береза повисла	2349,4	28,0	1,19	4,2	2,2	1,5	2,2	6,2
Осика	133,3							
Вільха чорна	7508,5	1122,7	14,95	212,9	139,5	117,6	131,8	421,6
Липа дрібнолиста	22,3	3,3	14,80					1,9
Тополя біла	4,6							
Тополя чорна	10,8	10,8	100,00	2,2				1,0
Верба козача	1,1							
Разом	27634,0	12387,1	44,83	925,7	1614,8	1394,9	1023,9	2220,5
у %%		100,00		7,47	13,05	11,26	8,27	17,93

Панівна порода	З них - лісові культури						
	за віковими групами, років						
	51-60	61-70	71-80	81-90	91-100	101-110	111-120
Сосна звичайна	2254,6	1216,8	622,5	347,7	174,8	32,5	1,6
Ялина європейська	15,7	4,8	29,5	15,1	4,4	4,0	
Модрина європейська							
Дуб червоний							
Дуб звичайний	288,7	51,9	10,3	4,2	1,9		
Гراب звичайний							
Ясен звичайний	0,3	6,0					
Клен гостролистий							
Акація біла							
Береза повисла	7,2		4,5				
Осика							
Вільха чорна	63,3	13,2	22,8				
Липа дрібнолиста		1,0	0,4				
Тополя біла							
Тополя чорна	7,6						
Верба козача							
Разом	2637,4	1293,7	690,0	367,0	181,1	36,5	1,6
у %%	21,29	10,44	5,57	2,96	1,46	0,29	0,01