МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
БІЛОЦЕРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Агробіотехнологічний факультет

Спеціальність Н4 «Лісове господарство»

«Допускається до захисту»
Зав. кафедри лісового та
садово-паркового господарства
_____ доц. Козінська Т.Б.
(підпис, вчене звання, прізвище, ініціали)

_____
«10» листопада 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

«ОЦІНЮВАННЯ СТІЙКОСТІ ДО КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН КОРІННИХ І ПОХІДНИХ ЯЛИННИКІВ ВЕРХОВИНСЬКОГО НАДЛІСНИЦТВА ФІЛІЇ «КАРПАТСЬКИЙ ЛІСОВИЙ ОФІС» ДП «ЛІСИ УКРАЇНИ»

Виконав: *Гаращук Володимир Леонідович* _____
прізвище, ім'я, по батькові *підпис*

Керівник: *доцент Соколенко К.І.* _____
вчене звання, прізвище, ініціали *підпис*

Рецензент: *доцент Горновська С.В.* _____
вчене звання, прізвище, ініціали *підпис*

Біла Церква – 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

БІЛОЦЕРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет агробіотехнологічний

Спеціальність Н4 «Лісове господарство»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Гарант ОП «Лісове господарство»
_____ доцент Левандовська С.М.
підпис *вчене звання, прізвище, ініціали*
«24» жовтня 2025 року

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу здобувача

Гаращуку Володимиру Леонідовичу
(прізвище, ім'я та по батькові)

Тема: «Оцінювання стійкості до кліматичних змін корінних і похідних ялинників Верховинського надлісництва філії «Карпатський лісовий офіс» ДП «Ліси України».
Керівник роботи: Соколенко Костянтин Іванович, канд.техн., наук, доцент.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджено наказом ректора №496/С від «04» жовтня 2025 р.
Термін здачі студентом готової кваліфікаційної роботи в деканат: до «03» жовтня 2026 р.
Вихідні дані: Пояснювальна записка та План лісоуправління Верховинського надлісництва філії «Карпатський лісовий офіс» ДП «Ліси України», звіт для громадськості за 2025 рік, таксаційний опис, статистичні матеріали за 3–5 років і результати польових досліджень.

Перелік графічних матеріалів: матеріали польових та камеральних досліджень, фотоматеріали.

Календарний план виконання роботи

Етап виконання	Дата виконання етапу	Відмітка про виконання
Огляд літератури	Грудень 2025	Виконано
Методична частина	Січень-лютий 2026	Виконано
Дослідницька частина	Березень-серпень 2026	Виконано
Оформлення роботи	Вересень 2026	Виконано
Перевірка на плагіат	Листопад 2026	Виконано
Попередній розгляд на кафедрі	Листопад 2026	Виконано
Подання на рецензування	Листопад 2026	Виконано

Керівник кваліфікаційної роботи _____ доцент Соколенко К.І.
підпис *вчене звання, прізвище, ініціали*

Здобувач _____ Гаращук В.Л.
підпис *прізвище, ініціали*

Дата отримання завдання «24» листопада 2025 р.

БІЛОЦЕРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ДЕКЛАРАЦІЯ
про дотримання академічної доброчесності під час виконання кваліфікаційної роботи

Я, Гаращук Володимир Леонідович,
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача вищої освіти)

здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти за освітньою програмою Лісове господарство, підтверджую, що кваліфікаційну роботу з теми: «Оцінювання стійкості до кліматичних змін корінних і похідних ялинників Верховинського надлісництва філії «Карпатський лісовий офіс» ДП «Ліси України».
виконано мною з дотриманням принципів і правил академічної доброчесності.

Підтверджую, що:

- роботу виконано особисто на основі власних розробок і суджень;
- у роботі належним чином зазначено авторство та джерела використаних текстів, ідей, даних, зображень та інших матеріалів;
- наведені результати дослідження, дані та висновки є достовірними;
- робота не містить свідомо сфабрикованої чи сфальсифікованої інформації.

У процесі виконання роботи було використано інструменти штучного інтелекту, зокрема для оформлення та редагування тексту (ChatGPT, Claude), для перекладу тексту (Deepl), для створення або редагування зображень (ChatGPT, Claude). Відомості про це наведено в роботі згідно з вимогами законодавства та встановленими правилами академічної доброчесності.

(у разі використання ШІ обрати відповідну опцію)

Я усвідомлюю відповідальність за зміст кваліфікаційної роботи та дотримання вимог академічної доброчесності під час її підготовки.

Дата: 02.11.2026р.

Здобувач вищої освіти: _____

(підпис / кваліфікований електронний підпис)

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БНАУ	Білоцерківський національний аграрний університет
ГІС	географічна інформаційна система
ГТК	гідротермічний коефіцієнт Селянинова
ДАЛРУ	Державне агентство лісових ресурсів України
ДП	державне підприємство
ДСНС	Державна служба України з надзвичайних ситуацій
ЗІЗ	засоби індивідуального захисту
ІБТ	індекс біотичного тиску
ІГЛ	Інститут гірського лісівництва
ІСС	індекс санітарного стану
МОЗ	Міністерство охорони здоров'я України
МОП	Міжнародна організація праці
н.р.м.	над рівнем моря
НІР	найменша істотна різниця
НШВЧ	небезпечні і шкідливі виробничі чинники
ОРА	опорно-руховий апарат
ТПП	тимчасова пробна площа
СанПіН	санітарні правила і норми
ТПП	тимчасова пробна площа
УкрГМЦ	Український гідрометеорологічний центр
ЦГМС	центр гідрометеорологічної служби
ANOVA	дисперсійний аналіз (analysis of variance)
CABI	Centre for Agriculture and Bioscience International
GPS	глобальна система позиціонування (global positioning system)
NDVI	нормалізований різницевий вегетаційний індекс (normalized difference vegetation index)
NIR	ближній інфрачервоний діапазон (near-infrared)
ns	статистично не значущий (not significant)
QGIS	відкрита ГІС-платформа (Quantum GIS)
RED	червоний спектральний канал
SAT	сума активних температур (понад 10 °C)
SPEI	стандартизований індекс опадів та евапотранспірації (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)
SSP	спільні соціально-економічні шляхи (shared socioeconomic pathways)
SSR	мікросателітні маркери (simple sequence repeats)
URL	уніфікований локатор ресурсу (uniform resource locator)
UTM	універсальна поперечна проєкція Меркатора (universal transverse Mercator)
WGS 84	Всесвітня геодезична система 1984 (World Geodetic System)

АНОТАЦІЯ

Гаращук В.Л. Оцінювання стійкості до кліматичних змін корінних і похідних ялинників Верховинського надлісництва філії «Карпатський лісовий офіс» ДП «Ліси України».

Кваліфікаційна робота присвячена порівняльній оцінці продуктивності, санітарного стану та стійкості корінних і похідних ялинників Верховинського надлісництва, дослідженню впливу кліматичних змін, шкідників і збудників хвороб та обґрунтуванню заходів підвищення стійкості насаджень.

Мета роботи – порівняти таксаційні показники, санітарний стан і стійкість корінних та похідних ялинників Верховинського надлісництва в умовах зміни клімату, визначити закономірності їх деградації та розробити рекомендації щодо підвищення стійкості насаджень і вдосконалення лісозахисних заходів.

У результаті дослідження встановлено, що:

– у 1991–2024 рр. середньорічна температура зросла на 1,4 °С, літні опади зменшилися на 38 мм, а частка посушливих декад збільшилася з 14,8 до 33,1 %;

– корінні ялинники мають вищі таксаційні показники: запас деревини – 432 м³/га проти 323 м³/га, відносна повнота – 0,83 проти 0,60; індекс санітарного стану становить 1,73 проти 2,88, а частка здорових дерев – 48,2 % проти 21,5 %;

– у похідних ялинниках ураженість *Ips typographus* сягає 61,3 %, а *Heterobasidion annosum* – 42,0 %, що у 4,6 та 6,2 раза відповідно перевищує показники корінних насаджень;

– природне поновлення ялини становить 3400 шт./га в корінних насадженнях верхнього висотного поясу та 420 шт./га – у похідних ялинниках нижнього поясу;

– за даними NDVI за 2001–2024 рр. індекс у похідних ялинниках знизився з 0,790 до 0,610, тоді як у корінних зміни були незначними;

– обґрунтовано необхідність пріоритетного лісозахисту й реконструкції похідних ялинників, формування стійкіших деревостанів і застосування супутникового моніторингу для раннього виявлення деградації.

Кваліфікаційна робота містить 67 сторінки, з них основного тексту – 56 сторінок включає 5 розділів, висновки та пропозиції, список літератури з 58 джерел і додатки; у тексті подано 10 таблиць і 16 рисунків.

Ключові слова: корінні ялинники, похідні ялинники, санітарний стан, *Ips typographus, Heterobasidion annosum,* кліматичні зміни, NDVI, стійкість деревостанів, деградація лісів.

ABSTRACT

Harashchuk V.L. Assessment of the resilience of primary and secondary spruce forests to climate change in the Verkhovyna forestry district of the "Carpathian forest office" branch of the State Enterprise "Forests of Ukraine".

The qualification work is devoted to a comparative assessment of the productivity, sanitary condition, and resilience of primary and secondary spruce stands in the Verkhovyna Forestry Unit, examining the effects of climate change, pests, and pathogens, and substantiating measures to improve stand resilience.

The aim of the study is to compare the mensurational parameters, sanitary condition, and resilience of primary and secondary spruce stands under climate change, identify patterns of their degradation, and develop recommendations for improving stand resilience and forest protection measures.

The study established that:

– during 1991–2024, the mean annual air temperature increased by 1.4 °C, summer precipitation decreased by 38 mm, and the proportion of dry ten-day periods increased from 14.8% to 33.1%;

– primary spruce stands had higher mensurational parameters: growing stock of 432 m³/ha compared with 323 m³/ha, relative stocking of 0.83 compared with 0.60, a sanitary condition index of 1.73 compared with 2.88, and a proportion of healthy trees of 48.2% compared with 21.5%;

– in secondary spruce stands, infestation by *Ips typographus* reached 61.3%, while infection by *Heterobasidion annosum* reached 42.0%, respectively 4.6 and 6.2 times higher than in primary stands;

– natural spruce regeneration reached 3,400 trees/ha in primary stands of the upper elevation belt, compared with 420 trees/ha in secondary stands of the lower belt;

– NDVI analysis for 2001–2024 showed a decline from 0.790 to 0.610 in secondary spruce stands, whereas changes in primary stands were minor;

– the study substantiated the need to prioritize forest protection and the reconstruction of secondary spruce stands, establish more resilient forest stands, and apply satellite monitoring for the early detection of degradation.

The qualification thesis comprises 67 pages, including 56 pages of main text, five chapters, conclusions and recommendations, a list of 58 references, and appendices. It contains 10 tables and 16 figures.

Keywords: primary spruce stands, secondary spruce stands, sanitary condition, *Ips typographus*, *Heterobasidion annosum*, climate change, NDVI, stand resilience, forest degradation.

ЗМІСТ

ВСТУП 8
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНЮВАННЯ СТІЙКОСТІ ЯЛИННИКІВ ДО КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН 10
1.1. Концепція стійкості лісових екосистем: сутність, класифікація та методи кількісного вимірювання 10
1.2. Ялина звичайна (*Picea abies* (L.) Karst.): систематика, ареал, екологія та фізіологічні механізми стійкості 12
1.3. Корінні та похідні ялинники Карпат: лісівниче походження, ценотична структура і диференційована стійкість 15
1.4. Кліматичні зміни у Карпатському регіоні: спостережні дані, механізми та прогнози 18
1.5. Вплив біотичних стресорів і синергетичний каскад деградації ялинників 20
РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНО-КЛІМАТИЧНИХ УМОВ РЕГІОНУ ДОСЛІДЖЕНЬ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ВИРОЩУВАННЯ ДЕРЕВОСТАНІВ 24
2.1. Місцезнаходження та організаційна структура 24
2.2. Природно-кліматичні умови 25
2.3. Характеристика лісового фонду регіону досліджень 28
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ТА ОРГАНІЗАЦІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ 32
РОЗДІЛ 4. ПОРІВНЯЛЬНА ТАКСАЦІЙНА ТА ЛІСОПАТОЛОГІЧНА ОЦІНКА КОРІННИХ І ПОХІДНИХ ЯЛИННИКІВ ВЕРХОВИНСЬКОГО НАДЛІСНИЦТВА ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЇХНЬОЇ СТІЙКОСТІ 38
4.1. Динаміка кліматичних показників у районі Верховинського надлісництва (1991–2024 рр.) 38
4.2. Порівняльна таксаційна характеристика корінних і похідних ялинників 41
4.3. Лісопатологічна оцінка і вплив біотичних агентів на деревостани 43
4.4. Оцінювання стійкості корінних і похідних ялинників 47
4.5. NDVI-аналіз і просторова динаміка деградації ялинників 50
4.6. Практичні лісогосподарські рекомендації щодо покращення насаджень Верховинського надлісництва 52
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ ПОЛЬОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ 55
5.1. Нормативно-правова база та ідентифікація небезпечних і шкідливих виробничих чинників під час польових робіт у лісі 55
5.2. Організаційні та технічні заходи забезпечення безпеки польових робіт у насадженнях з осередками всихання 58
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ 61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 64
ДОДАТКИ 71

ВСТУП

Ялинники Українських Карпат належать до лісових екосистем, особливо чутливих до впливу кліматичних змін. За останні два десятиліття спостерігається підвищення середньорічної температури на 1,2–1,8 °С, зміна режиму зволоження та почастішання посушливих періодів, що знижує стійкість ялинових деревостанів [4].

Верховинське надлісництво є одним із регіонів значного поширення ялинників, де представлені як корінні, так і похідні насадження, сформовані на місці ялицево-букових та букових лісів. Їх порівняльне оцінювання є основою дослідження стійкості ялинників до кліматичних змін.

Актуальність роботи зумовлена катастрофічним всиханням ялинників Карпат у 2010-х–2020-х рр. внаслідок комплексного впливу потепління клімату, масового розмноження короїда-типографа та кореневої губки; необхідністю науково обґрунтованої реструктуризації лісового господарства регіону та відсутністю комплексних кількісних оцінок порівняльної стійкості корінних і похідних ялинників на рівні конкретного надлісництва.

Метою кваліфікаційної роботи є комплексне оцінювання стійкості до кліматичних змін корінних і похідних ялинників Верховинського надлісництва на основі аналізу кліматичних рядів, лісовпорядкувальної документації, лісопатологічних матеріалів та польових обліків.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі *завдання:*

- проаналізувати теоретичні основи стійкості лісових екосистем та узагальнити зарубіжний і вітчизняний досвід оцінювання реакції ялинників на кліматичні зміни;

- охарактеризувати природні умови та лісовий фонд Верховинського надлісництва;

- розробити методику польових та камеральних досліджень і провести таксацію, санітарну оцінку ялинників;

- встановити кореляцію між кліматичними аномаліями та динамікою радіального приросту корінних і похідних ялинників;

- обґрунтувати заходи з підвищення стійкості насаджень та безпеку праці під час польових робіт.

Об'єкт дослідження – корінні та похідні ялинники Верховинського надлісництва філії «Карпатський лісовий офіс» ДП «Ліси України».

Предмет дослідження – показники стійкості ялинових деревостанів (таксаційні характеристики, санітарний стан, радіальний приріст) та їх зв'язок із кліматичними змінами.

Методи дослідження – лісівничо-таксаційний (закладання та опис тимчасових пробних площ, визначення основних таксаційних показників, опрацювання й аналіз матеріалів лісовпорядкування); лісопатологічний, статистичний, ГІС-картографічний, дистанційного зондування Землі.

Наукова новизна одержаних результатів. Уперше для Верховинського надлісництва комплексно оцінено стійкість корінних і похідних ялинників до кліматичних змін, визначено особливості реакції їхнього радіального приросту на кліматичні аномалії та обґрунтовано напрями підвищення стійкості деревостанів.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дослідження можуть бути використані Верховинським надлісництвом для оцінювання стану та стійкості ялинників, планування лісогосподарських і лісовідновних заходів, спрямованих на зменшення негативного впливу посух, температурних аномалій та інших кліматичних чинників.

РОЗДІЛ 1
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНЮВАННЯ СТІЙКОСТІ ЯЛИННИКІВ ДО КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН

1.1. Концепція стійкості лісових екосистем: сутність, класифікація та методи кількісного вимірювання

Поняття стійкості лісових екосистем суттєво змінилося за останні 50 років: від вузького розуміння як сталості кількісних параметрів насадження до здатності екосистеми зберігати свої функції, структуру та ідентичність за зовнішніх збурень. Класичне визначення C.S. Holling [37] описує стійкість як здатність системи поглинати збурення і реорганізовуватися, зберігаючи функції та структуру. Це протиставлялося «інженерному» розумінню, яке зводить стійкість до мінімальних відхилень від рівноваги та швидкості повернення до неї.

Для лісів виокремлюють «специфічну» стійкість до конкретного збурення (наприклад, ялинника до посухи 2017 р.) та «загальну» стійкість, тобто здатність підтримувати функції за будь-яких збурень, зокрема несподіваних. Остання визначається структурним і функціональним різноманіттям і є значно вищою у корінних різновікових ялинниках, ніж у похідних монодомінантних насадженнях [37].

Seidl et al. [52, 53] запропонували тричленну класифікацію: резистентність (здатність протистояти збуренню без суттєвих відхилень), пружність (швидкість відновлення після збурення) та адаптивну здатність (перебудова організації екосистеми в нових умовах, зокрема через природне поновлення посухостійкіших видів – бука, ялиці, клена гірського) [10, 50].

Кількісно стійкість для дерев оцінюють за дендрохронологічними рядами приросту. Автори [44] запропонували три індекси реакції на стресовий рік: нижчий Rt означає слабшу резистентність, вищий Rs – кращу пружність. Їх широко застосовують для ялини в Карпатах, Альпах і Скандинавії [44].

Концепція «синдрому відмирання» [52, 53] розглядає всихання ялинників як накопичувальний процес: кожна стресова подія (посуха, буревій, спалах шкідника) послаблює деревостан, і після кількох таких подій навіть незначне збурення може спричинити колапс. Особливо це характерно для похідних ялинників із накопиченим стресом від невідповідності місцезростанню [52].

Allen et al. [30] у глобальному огляді понад 200 випадків масового всихання дійшли висновку, що найчастіше воно спричинене поєднанням кліматичного стресу (посуха, спека) і біотичного агента (комаха-ксилофаг або патоген). Окремо жоден із чинників не є достатнім. Саме так, за їхніми даними, пояснюється катастрофічне всихання ялини в Карпатах після посух 2015–2019 рр. [30].

Стійкість деревостану визначається структурними, функціональними та генетичними чинниками. Автори [39, 40] називають чотири ознаки стійкого деревостану: вікову різноманітність, видову домішку, просторову мозаїчність і генетичне різноманіття. Усі вони у корінних ялинниках виражені значно сильніше, ніж у монокультурах.

Lindner et al. [43] показали, що переважна більшість із понад 350 вивчених видів лісових дерев Європи вразлива щонайменше до одного кліматичного ризику. Найуразливішими є монодомінантні одновікові насадження, насадження на граничних висотах поза природним ареалом і насадження з пошкодженою мікоризосферою. За всіма трьома критеріями похідні ялинники нижніх поясів Карпат є найвразливішими [43].

Резистентність і пружність різняться між породами. Vitali et al. [57] порівняли ялину, ялицю і дугласію під час екстремальних посух у Швейцарії та Баварії. Середній Rt при посусі 2003 р. становив 0,64 для ялини, 0,84 для ялиці та 0,89 для дугласії. Через 5 років ялина відновила лише 78–82 % попереднього приросту, тоді як ялиця – 92–96 %. Ці дані обґрунтовують реконструкцію ялинників шляхом введення ялиці та бука [57].

1.2. Ялина звичайна (*Picea abies* (L.) Karst.): систематика, ареал, екологія та фізіологічні механізми стійкості

Ялина звичайна (*Picea abies* (L.) Karst., синоніми: *P. excelsa* Link, *P. abies* var. *abies*) – представник родини *Pinaceae* Lindl., роду *Picea* A. Dietr., нараховує понад 30–40 підвидів і різновидів, що відрізняються морфологією шишок, хвої і кори. В межах Карпат найбільш поширений підвид *Picea abies* subsp. *abies* – типова форма з природного ареалу, хоча у різних частинах ареалу фіксуються значні внутрішньовидові варіації у зимостійкості, посухостійкості і темпах росту [40].

Природний ареал ялини звичайної охоплює декілька великих масивів: Скандинавський (Норвегія, Швеція, Фінляндія) – суцільна бореальна зона; Центральноєвропейський гірський – Альпи (Австрія, Швейцарія, Баварія, Словенія), Богемський масив (Чехія, Словаччина, Польща), Карпати (Польща, Словаччина, Румунія, Україна) та Балкани; Рівнинний Центральноєвропейський – фрагментарні масиви у Польщі, Прибалтиці, а також в Україні (Полісся). В Україні ялина є єдиним аборигенним представником роду *Picea* і зустрічається виключно в Карпатах (гірський ареал на висотах 900–1 550 м) та у реліктових осередках на Поліссі [33].

Верхня межа ялинового поясу у Верховинському районі Івано-Франківщини проходить на висоті 1 450–1 550 м н.р.м., де ялина вступає в контакт з субальпійськими криволіссями (*Pinus mugo*). Нижня межа природного ялинового поясу – близько 950–1 100 м н.р.м., де відбувається перехід до поясу ялицево-букових (ялиця та бук) і бучинних (бук) лісів. Таким чином, усі ялинники на висотах нижче 950–1 000 м у Верховинському надлісництві є похідними – тобто сформованими поза межами природного кліматичного ареалу ялини, що зумовлює їх підвищену вразливість до кліматичних змін [46].

Ялина є мезофітом і мікротермом із порівняно вузькою екологічною амплітудою щодо температури і вологості. Оптимальна середня температура вегетаційного сезону (травень–вересень) – +8…+14°C. При підвищенні середньої серпневої температури понад +17–18°C фотосинтетична ефективність

ялини різко знижується, і дерева починають витрачати більше асимілятів на дихання, ніж накопичують у фотосинтезі. Ця термофізіологічна межа є ключовою: у сезони з аномально жарким серпнем (2003, 2015, 2017 рр.) дерева ялини масово ослаблювались не лише через дефіцит вологи, але і через безпосередній тепловий стрес. Підвищення температури вегетаційного сезону у Карпатах на +1,4°C за 1991–2025 рр. означає, що нижні висотні пояси регулярно виходять за термофізіологічну межу ялини навіть у «нормальні» роки [30].

Особлива вразливість ялини до водного стресу зумовлена її поверхневою кореневою системою. Більшість активних всмоктувальних коренів ялини сконцентрована у шарі 0–40 см ґрунту – там, де волога при посусі зникає першою. На відміну від бука і ялиці, ялина не здатна активно «заглиблювати» кореневу систему у посушливі роки. При ГТК < 0,5 протягом двох суміжних декад тиск у ксилемі різко знижується, відкривається кавітація (розрив водяних стовпчиків у ксилемі), і транспорт води від коренів до крони різко обмежується. Це ключовий фізіологічний механізм, через який посуха «вимикає» смолопродукуючу систему ялини і відкриває ворота для заселення короїдом [56].

Смолопродукуюча система ялини є її ключовим захисним механізмом проти ксилофагів. У здорових деревах смоляні ходи кори і ксилеми підтримують тиск до 0,8–1,5 МПа. Дослідження Seidl et al. [52] встановили, що при тиску смоли > 0,6 МПа самка *I. typographus* не здатна прогризти захисний коровий бар'єр до флоеми – і атака залишається безрезультатною. При тиску < 0,3 МПа (що типово для ялин у посушливих умовах) короїд легко досягає флоеми, де відкладає яйця. Тобто кліматичний водний стрес є «перемикачем», що переводить ялину зі стану «недоступна для короїда» у стан «доступна» [53].

Вікові відмінності у стресостійкості ялини є суттєвими і важливими для інтерпретації даних польових досліджень. Molina et al. [48] встановили, що стара ялина (> 120 років) у природних різновікових ялинниках демонструє значно вищу резистентність до посухи (Rt = 0,78–0,88) порівняно з молодими і

середньовіковими деревами у похідних монокультурах (Rt = 0,55–0,68). Пояснення парадоксу – у старих деревах накопичені значні запаси вуглеводів (NSC, non-structural carbohydrates), що дозволяють підтримувати смолопродукцію навіть при обмеженому фотосинтезі під час посухи. Молоді дерева у щільних монокультурах із жорсткою конкуренцією за ресурси не мають таких запасів [48].

Генетична структура популяцій ялини у Карпатах є неоднорідною і відображає постгляціальну колонізацію регіону з кількох рефугіумів. Schmitt et al. [51] на основі молекулярно-генетичного аналізу (SSR-маркери) 45 популяцій ялини у Карпатах виявили дві основні філогеографічні лінії: «Альпійська» (з рефугіуму в Австрійських Альпах) і «Східнокарпатська» (з рефугіуму у Румунських Карпатах). Верховинський район Івано-Франківщини знаходиться у зоні їх контакту і характеризується підвищеним генетичним різноманіттям – що є позитивним чинником для природної адаптивної потенційності корінних ялинників [51].

Важливим чинником стійкості похідних ялинників є їхня генетична відповідність кліматичним умовам місцезростання. Значна частина таких насаджень у нижніх висотних поясах Українських Карпат сформувалася з насінного матеріалу, походження якого пов’язане з вищими гірськими районами або іншими регіонами Європи, зокрема Альпами та Богемським масивом. За умови перенесення насіння з холодніших і вологіших місцезростань у тепліші умови нижніх поясів дерева можуть зберігати генетично зумовлені особливості адаптації до клімату регіону походження. Внаслідок цього їхні фізіологічні потреби та реакції на температурний і водний режими можуть не відповідати фактичним умовам середовища.

Таку невідповідність між кліматичними умовами походження деревного матеріалу та сучасними умовами його зростання розглядають у контексті явища кліматичного боргу, хоча точне трактування терміна залежить від використаного джерела. За недостатньої адаптації до підвищення температури й посилення посух дерева можуть раніше втрачати фізіологічну стійкість,

повільніше відновлювати водний баланс і витрачати більше ресурсів на підтримання життєдіяльності. Це, своєю чергою, може знижувати їхню здатність протистояти біотичним чинникам, зокрема стовбуровим шкідникам і фітопатогенним грибам. Отже, походження насінного матеріалу є важливим чинником оцінювання довгострокової стійкості похідних ялинників до кліматичних змін.

У зв'язку з цим під час відновлення лісів доцільно враховувати не лише продуктивність ялини звичайної (*P. abies*), а й походження насіння, відповідність його кліматичним умовам конкретного висотного поясу та потенціал адаптації до прогнозованих змін клімату. Водночас твердження про переважне походження насінного матеріалу похідних ялинників Карпат із верхніх поясів, Альп і Богемського масиву, а також посилання на McLachlan et al. [47] потребують перевірки за першоджерелом, перш ніж використовувати їх як установлені факти.

1.3. Корінні та похідні ялинники Карпат: лісівниче походження, ценотична структура і диференційована стійкість

Корінні ялинники Карпат (асоціації *Piceetum myrtillosum, Piceetum hylocomiosum, Abieto-Piceetum, Calamagrostio villosae-Piceetum*) є зональним типом рослинності субальпійського і верхнього гірського поясу, що відповідає відповідному кліматичному оптимуму ялини. Вони сформувались у результаті природних сукцесійних процесів протягом 8 000–10 000 років після відступу льодовиків, пройшовши через кілька стадій від заростання тундри до формування сучасного вигляду субальпійського ялинника. Ця тривала коевоюція ялини і її асоційованих організмів (мікоризних грибів, ентомофагів короїда, ґрунтових безхребетних) сформувала стійку екосистему з розвиненою системою внутрішніх регуляторних механізмів [25, 40].

Структурна характеристика корінних ялинників принципово відрізняється від похідних монокультур. Різновіковість є ключовою ознакою: в одному деревостані одночасно присутні дерева від підросту 2–5 років до

перестійних 180–250-річних екземплярів, що утворюють складний рівневий вертикальний профіль. Kirby and Watkins [40] показали, що у такому різновіковому деревостані при нападі *I. typographus* в умовах незначного стресу жуки заселяють передусім фізіологічно найбільш ослаблені – старі і механічно пошкоджені – дерева. Молоді і середньовікові дерева з достатнім смоловим тиском успішно відбивають атаку. Таким чином, короїд виконує функцію «санітара», не розвиваючись у масовий спалах.

Мікоризосфера корінних ялинників є значно більш різноманітною і стійкою, ніж у похідних насадженнях. Brundrett and Tedersoo [32] дослідили видове різноманіття ектомікоризних грибів у корінних (n=12) і похідних (n=18) ялинниках Карпат (Польща і Україна) і встановили: корінні ялинники – 35–48 видів мікоризоутворювачів на ПП 400 м²; похідні – лише 12–22 види. Ця різниця відображає вплив суцільних рубок на ґрунтовий мікробіом: при суцільній рубці знищується не лише деревостан, але і мікоризна мережа, яка відновлюється значно повільніше (10–25 років) – і нерідко неповністю. Збіднена мікоризосфера знижує здатність ялини ефективно поглинати воду і поживні речовини, підвищуючи її вразливість до стресу [32].

Природне поновлення під наметом є ще одним показником стійкості і санітарного стану корінного ялинника. У природних насадженнях верхнього гірського поясу Верховинського надлісництва щільність підросту ялини під наметом становить 2 000–8 000 шт./га, що забезпечує безперервне відновлення деревостану після відпаду окремих дерев без необхідності штучного втручання. У похідних ялинниках нижніх поясів природне поновлення ялини під наметом зазвичай незадовільне (менше 1 000 шт./га) через ущільнення ґрунту від машинного освоєння та незбалансованість мікрокліматичних умов.

Масштабна трансформація гірських лісів Карпат розпочалась у XVIII–XIX ст. і досягла піку у другій половині XIX – першій половині XX ст. За даними Palko and Davide [49], площа ялинових монокультур у Карпатах збільшилась з 350 тис. га у 1850 р. до 1 650 тис. га у 1970 р. – тобто у 4,7 рази. Основною причиною була економічна перевага ялини: висока якість деревини,

швидкий ріст, легкість трелювання у гірських умовах і стабільний ринковий попит лісопромисловості. Лісове господарство цього періоду не враховувало довгострокових екологічних наслідків масового насадження ялини поза її природним ареалом.

Hlásny et al. [36] детально проаналізували структурні вади похідних ялинників, що безпосередньо визначають їх вразливість. По-перше, одновіковий монодомінантний склад: 90–100 % ялини, всі дерева у вузькому діапазоні вікових класів (±15–20 р.). При масовому ослабленні деревостану посухою всі дерева одночасно мають знижений смоловий тиск – і всі є однаково вразливими до короїда. По-друге, збіднена ґрунтова флора та мікоризосфера: після суцільних рубок і лісозаготівельного освоєння ґрунтовий покрив, ґрунтова жива речовина і мікоризна мережа відновлюються неповністю. По-третє, кореневі анастомози й *H. annosum*: суцільні рубки залишали пні, заражені кореневою губкою, яка за десятиліття поширилась кореневими з'єднаннями на більшість дерев деревостану [11, 22, 36].

Temperli et al. [55] на основі лісосукцесійної моделі ForClim розрахували, що за кліматичним сценарієм RCP 4.5 до 2100 р. продуктивність ялини у похідних ялинниках нижніх поясів (600–900 м) знизиться у середньому на 45–60 % порівняно з сучасним рівнем, тоді як продуктивність бука і ялиці на тих самих висотах збільшиться або залишиться стабільною. Це моделювання підтверджує, що відновлення корінного типу лісу (ялицево-бучини, бучини) на місці деградованих похідних ялинників є не лише екологічно доцільним, але й економічно раціональним у довгостроковій перспективі [26, 55].

Статистика масового всихання підтверджує теоретичні прогнози. ІГЛ НААНУ [3] встановив, що у Карпатах 89–92 % площ загиблих ялинників після 2015 р. знаходяться на висотах нижче 950 м – тобто виключно у зоні похідних насаджень. Korneef et al. [41] у просторовому аналізі 145 осередків всихання встановили, що лише 8 % із них починались у корінних ялинниках верхнього поясу – і то лише при граничних умовах кількарічної посухи. Це є

статистичним підтвердженням диференційованої стійкості двох типів насаджень [41].

1.4. Кліматичні зміни у Карпатському регіоні: спостережні дані, механізми та прогнози

Системний аналіз метеорологічних рядів для Карпатського регіону демонструє однозначні і прискорювані кліматичні тенденції. Palko and Davide (2017) у доповіді UNECE для Карпатської дуги встановили, що середньорічна температура за 1961–2014 рр. зросла на +1,0–1,6°C залежно від місцевості, причому найбільш виражений тренд – у зимовий і весняний сезони (+1,4–1,8°C), найменш виражений – у літній (+0,8–1,2°C). Хоча підвищення літніх температур є меншим за абсолютними значеннями, воно є найбільш критичним для ялини, оскільки саме літня температура визначає баланс між фотосинтезом і диханням, а також ступінь фізіологічного посухового стресу [49].

Адаменко та ін. [1] проаналізували метеорологічні ряди 12 станцій Івано-Франківської і Закарпатської областей за 1961–2020 рр. Для Верховинського і Косівського районів встановлено: підвищення середньорічної температури на +1,2–1,6°C; збільшення SAT > 10°C на 150–180°C; зростання середньої тривалості «жарких хвиль» (> 30°C впродовж ≥ 5 днів) з 2–3 до 8–12 днів за сезон; скорочення тривалості снігового сезону на 18–26 діб. Ці зміни за темпом і масштабами перевищують кліматичні проекції середнього рівня і відповідають сценарію RCP 6.0 [1].

Зміна тривалості вегетаційного сезону має двоякий ефект на ялину: з одного боку, більш рання весна (на 8–12 днів за 30 років) дає ялині більший час для фотосинтезу; з іншого боку, рання вегетація підвищує ризик пізніх весняних заморозків (повернення морозів у квітні–травні), які тепер вражають вже активно ростучу хвою і молоді пагони. Teuling et al. [56] показали, що частота весняних «хвиль холоду» після ранньої вегетації зростає у зв’язку зі зростаючою варіабельністю весняної погоди. Пошкодження молодих пагонів

ялини весняними заморозками суттєво знижує приріст поточного сезону і накопичення NSC-запасів [56].

Зміни у режимі зволоження є критично важливим кліматичним чинником для ялинових насаджень. Хоча в деяких районах Карпат річна кількість опадів незначно зростає, набагато важливішим є сезонний розподіл. Senf et al. [54] аналізують дані по 200 метеостанціях Центральної Європи і встановлюють посилення «сезонного контрасту»: збільшення кількості опадів у зимовий і ранньовесняний період (нерідко у вигляді дощу, а не снігу) при зменшенні кількості опадів у червні-вересні – критичний вегетаційний сезон ялини. Індекс SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) за червень–вересень показує достовірний негативний тренд для більшості районів Карпат: сезони стають посушливішими [54].

Показовою є статистика «рекордно посушливих» вегетаційних сезонів за останні 30 років. Buras and Menzel [33] систематизували дані для Карпатського регіону: 5 з 10 найпосушливіших сезонів за 1960–2018 рр. припали на 2000–2018 рр. (2000, 2003, 2007, 2012, 2015, 2017 рр.). Жоден із 10 найпосушливіших сезонів не припадав на 1960–1980 рр. Ця статистика свідчить про системну, а не випадкову зміну кліматичних умов [33].

Особливого значення для ялинових насаджень набуває зміна снігового режиму – явище, що нерідко недооцінюється у порівнянні з температурними і опадними тенденціями. Стабільний і глибокий сніговий покрив виконував три ключові захисні функції для ялини: ізоляція кореневої системи від глибокого промерзання ґрунту, захист підросту від знищення козулею і оленем, і стабілізація ґрунтової вологи в ранньовесняний період. Скорочення тривалості снігового покриву на 18–26 діб означає послаблення всіх трьох функцій [49].

За шостою оціночною доповіддю IPCC (2023), для зони Центральної та Східної Європи (KNMI climate atlas, регіон CEE) до 2050 р. за сценарієм SSP2-4.5 очікується: підвищення середньорічної температури ще на +1,2–1,8°C понад рівень 2010-х рр.; збільшення частоти і тривалості хвиль спеки (> +30°C протягом ≥ 5 днів) на 35–55 %; зменшення кількості опадів у червні–серпні на

8–15 %; збільшення максимальних добових опадів (інтенсивних злив) при меншій загальній кількості дощових діб. За сценарієм SSP3-7.0 всі ці тенденції посилюються у 1,5–2 рази [38].

Mátyás et al. [46] прогнозують підвищення нижньої межі кліматично придатного ареалу ялини в Карпатах до 1200–1350 м до 2070 р. за сценарієм RCP 6.0, що створює ризики деградації похідних ялинників на висотах 600–1100 м. За сценарієм RCP 8.5 придатний ареал ялини може скоротитися до 35–45 % сучасного рівня до 2100 р. [46].

За даними Forest Europe [34], у 2010–2022 рр. обсяги деревини, пошкодженої кліматично зумовленими порушеннями лісових екосистем, у 2–4 рази перевищували показники 1990-х рр. Найбільші втрати зафіксовано в ялинниках Центральної Європи. Прогнозоване подальше зростання пошкоджень обґрунтовує необхідність поступового перетворення ялинових монокультур на стійкіші мішані насадження [34].

1.5. Вплив біотичних стресорів і синергетичний каскад деградації ялинників

Короїд-типограф (*Ips typographus* L., *Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae*) є провідним ентомологічним агентом масового всихання ялини. Його ставлення до ялини є класичним прикладом умовно-комменсального зв’язку, що в умовах кліматичних змін трансформується у летальний паразитизм. Біологія виду добре вивчена: жуки зимують під корою або у підстилці; навесні при прогріванні повітря до +16–18°C відбувається масовий вихід і ройова атака ослаблених дерев. Самки прокладають материнські ходи під корою у флоемі, де відкладають яйця. Личинки, що відродились, живляться флоемою і формують характерний «граверний» малюнок лубоїдних ходів. Повний цикл розвитку займає 6–9 тижнів залежно від температури [28, 36].

Вплив кліматичного потепління на популяційну динаміку *Ips typographus* є комплексним і багатосторонньо підтвердженим. По-перше, підвищення температури прискорює ембріональний і личинковий розвиток: при +18°C

повний цикл від яйця до імаго займає 8–9 тижнів (1–2 генерації/рік), при +24°C – 6–7 тижнів (2–3 генерації/рік). Тепліші роки дозволяють «сестринському поколінню» – другий виліт тих самих самок того ж сезону) завершити розвиток до зими, що різко збільшує чисельність зимуючої популяції. По-друге, теплі зими знижують зимову смертність жуків: при середній зимовій температурі > –5°C зимова смертність *I. typographus* знижується з 50–70 % до 20–30 % [42].

Взаємодія водного стресу та атак короїда має синергетичний характер. За Seidl et al. [52], зниження смолового тиску послаблює захист ялини, особливо за масового нападу шкідника. Критичне ослаблення дерев пов'язують із посушливими періодами, коли ГТК у червні–серпні опускається нижче 0,4. У Верховинському районі такі умови спостерігалися у 2000, 2007, 2012, 2015, 2017–2019 та 2021 рр. описують «порогову функцію» захисту ялини: при смоловому тиску > 0,6 МПа дерево надійно захищене; при 0,3–0,6 МПа – частково вразливе (при «масовій атаці» великих популяцій короїда); при < 0,3 МПа – повністю вразливе. Критичний перехід від захищеного до вразливого стану відбувається у посушливі роки, коли ГТК у червні–серпні падає нижче 0,4. Саме у такі роки фіксується масовий початок нових осередків всихання. У Верховинському районі такими роками були: 2000, 2007, 2012, 2015, 2017, 2018, 2019, 2021 [53].

Lange et al. [42] дослідили просторову динаміку поширення осередків *I. typographus* у Карпатах за допомогою серії знімків Landsat (2001–2018 рр.). Вони встановили, що у монодомінантних похідних ялинниках швидкість поширення осередку (у га/рік) у 5–7 разів вища, ніж у мішаних різновікових деревостанах того ж висотного поясу. Ширина «зони перехоплення» – відстань від кордону осередку до наступної атакованої ділянки – у монокультурах становила в середньому 85 м проти 420 м у мішаних насадженнях. Ця просторова статистика кількісно підтверджує захисну роль структурного різноманіття деревостану [42].

Коренева губка (*H. annosum* (Fr.) Bref.) є одним із найруйнівніших патогенів хвойних деревних видів у Північній і Центральній Європі. За

оцінками Garbelotto and Gonthier (2013), щорічні економічні збитки від *H. annosum* у лісах Європи перевищують 800 млн EUR [43] значно більше, ніж від будь-якого іншого грибкового патогену. В Україні коренева губка є домінуючою хворобою ялини і сосни і зустрічається у насадженнях, де проводились рубки [12, 28, 32].

Механізм зараження *H. annosum* добре вивчений. При рубці дерева свіжозрізаний пень є ідеальним субстратом для проростання базидіоспор губки: тепла і волога поверхня пня з підвищеним рівнем Mn^{2+}, що виділяється із пошкодженої деревини, стимулює масове осідання і проростання спор. Міцелій проникає у деревину пня і поширюється кореневою системою у ґрунт, де через кореневі анастомози і прямий контакт коренів потрапляє у живі сусідні дерева. [45] встановили, що у похідних ялинниках Литви і Латвії через 30 років після першої суцільної рубки ураженість дерев *H. annosum* досягає 45–70 %, після другої рубки через 30 років – 65–85 % [6, 7, 45].

Взаємодія *H. annosum* і *I. typographus* є синергетичною – кожен із патогенів підсилює вплив іншого. Дерева, уражені кореневою губкою, мають ослаблену транспірацію через пошкодження провідних тканин кореневої системи – що знижує тиск смоли у надземній частині стовбура і підвищує вразливість до короїда. Водночас ендофітні гриби, що асоціюються з *I. typographus* (*Ceratocystiopsis ranaculosus*, *Ophiostoma bicolor*, *Leptographium* sp.), блокують провідні тканини флоеми і прискорюють загибель дерева. Garbelotto and Gonthier [35] підсумовують: «дерево, уражене кореневою губкою, є дистресованим рослинним господарем, що надсилає хімічний сигнал атракції для *I. typographus*» – тобто мимоволі приваблює ксилофага [35].

Системне розуміння механізмів деградації ялинників вимагає розгляду їх як каскадного синергетичного процесу, у якому кожна наступна ланка посилює дію попередньої і знижує здатність системи відновитись. Allen et al. [30] описують загальну схему цього каскаду, яка представлена на рис. 1.1.

Bebi et al. [31] встановили, що великі вітровали (> 50 га) сприяють виникненню короїдних спалахів у прилеглих ялинниках. Радіус їх поширення

становить 800–2500 м у монодомінантних ялинниках і 150–400 м у мішаних різновікових насадженнях [31].



Рис. 1.1. **Послідовність розвитку та поширення осередків відмирання ялинників під впливом кліматичного стресу й біотичних чинників**

Розроблено автором за джерелом [30] із використанням ChatGPT як інструменту візуалізації.

Seidl et al. [52, 53] за допомогою моделі iLand оцінили вплив кліматичних сценаріїв і структури деревостанів на ризик всихання ялини. За сценарієм RCP 6.0 до 2060 р. цей ризик у монокультурних ялинниках нижніх висотних поясів може зрости у 3–5 разів, тоді як формування мішаних різновікових насаджень здатне знизити його у 2–3 рази, що підтверджує доцільність відновлення корінних ялицево-букових лісів Карпат [52, 53].

Висновки до розділу 1. Наукове дослідження стійкості ялинників до кліматичних змін ґрунтується на міждисциплінарному підході, що поєднує лісівничу екологію, ентомологію, фітопатологію та методи дистанційного зондування Землі й ГІС-аналізу. Масштабне всихання ялинників Центральної та Східної Європи у 2010–2023 рр. зумовило зміщення пріоритетів лісового господарства від максимальної продуктивності до забезпечення стійкості й резильєнтності насаджень. У розділі розглянуто теоретичні засади стійкості лісових екосистем, екологічні особливості ялини звичайної, відмінності корінних і похідних ялинників, кліматичні зміни в Карпатах, вплив біотичних стресорів і методи оцінювання стійкості насаджень.

РОЗДІЛ 2
ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНО-КЛІМАТИЧНИХ УМОВ РЕГІОНУ ДОСЛІДЖЕНЬ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ВИРОЩУВАННЯ ДЕРЕВОСТАНІВ

2.1. Місцезнаходження та організаційна структура

Верховинське надлісництво філії «Карпатський лісовий офіс» ДП «Ліси України» розташоване в східній частині Івано-Франківської області на території Верховинського та Надвірнянського адміністративних районів [2].

Загальна площа надлісництва становить 56 474,6869 га [19]. До складу надлісництва входять 14 лісництв, площа яких у структурі загальної площі надлісництва наведена у відсотках на рис. 2.1.

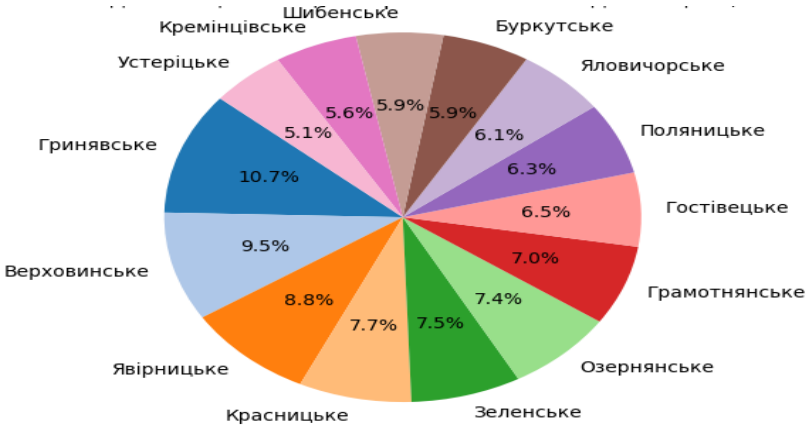

Рис. 2.1. **Розподіл площі між лісництвами Верховинського надлісництва філії «Столичний лісовий офіс» ДП «Ліси України»**

Розроблено автором за джерелом [19] із використанням ChatGPT як інструменту візуалізації.

Аналіз розподілу площі лісництв Верховинського надлісництва філії «Карпатський лісовий офіс» ДП «Ліси України» (рис. 2.1) показує відносно рівномірний розподіл території. Найбільшу частку займає Гринявське лісництво – 10,73 %, найменшу – Устеріцьке – 5,12 %. Переважання площ більшості лісництв у межах 5–8 % свідчить про відсутність значної диспропорції та створює сприятливі умови для ефективної організації лісогосподарської діяльності.

2.2. Природно-кліматичні умови

Територія Верховинського надлісництва філії «Карпатський лісовий офіс» ДП «Ліси України» відповідно до лісорослинного районування належить до району ялинових та буково-ялицево-ялинових високогірних лісів Українських Карпат і охоплює округи ялинових лісів Гринявських гір, ялиново-букових лісів Покутсько-Буковинських гір (Устеріцьке лісництво) та ялиново-ялицево-букових лісів високогірної частини Карпат. Територія розташована в межах висот 600–1800 м над рівнем моря, що зумовлює виражену вертикальну диференціацію природно-кліматичних умов.

Клімат (рис. 2.2) характеризується як перехідний від помірно теплого західноєвропейського до континентального східноєвропейського типу. Середньорічна температура повітря становить 7,1 °С, середньорічна кількість опадів – 870 мм, тривалість вегетаційного періоду – близько 165 днів, середня швидкість переважаючих вітрів – 3,4 м/с. Зі збільшенням висоти над рівнем моря змінюються температурний режим, вологість повітря та тривалість вегетаційного періоду, що безпосередньо впливає на формування, продуктивність і стійкість лісових деревостанів [18, 19].

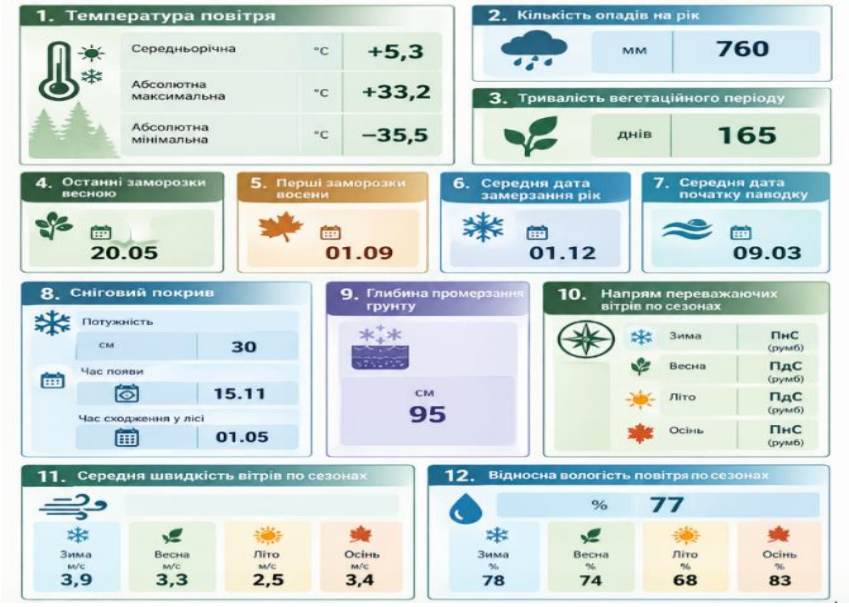

Рис. 2.2. **Основні кліматичні показники, що визначають умови ведення лісового господарства**

Розроблено автором за джерелом [19] із використанням ChatGPT як інструменту візуалізації.

Відповідно до розробленої класифікації М.С. Андріанова [19], на території надлісництва виділяють чотири вертикальні термічні зони: помірну, прохолодну, помірно-холодну та холодну. Помірна зона охоплює висоти до 850 м н.р.м., де середня температура липня становить +15…+17 °С, а січня – –5…–7 °С. Для прохолодної зони, яка поширюється в межах висот 850–1250 м н. р. м., характерне поступове зниження температури та скорочення тривалості вегетаційного періоду. У помірно-холодній та холодній зонах, розташованих вище 1250 м н.р.м., спостерігається подальше зниження температури повітря та істотне скорочення періоду активної вегетації, що визначає особливості росту, розвитку та продуктивності деревостанів.

Територія Верховинського надлісництва розташована в межах Покутсько-Мармароських Карпат і характеризується складним гірським рельєфом. Переважають схили крутизною 10–40° і більше, причому найбільш круті ділянки приурочені до нижніх і середніх частин гірських масивів. Основними експозиціями схилів є північно-східна, північно-західна, південно-західна та північна. Складність рельєфу зумовлює значну просторову диференціацію ґрунтових, гідрологічних і лісорослинних умов території.

Ґрунтовий покрив характеризується вираженою вертикальною зональністю. До висоти 1000–1200 м н.р.м. переважають бурі та світло-бурі гірсько-лісові ґрунти, тоді як у вищих висотних поясах поширені темно-бурі гірсько-лісові ґрунти. Основу ґрунтового покриву становлять гірсько-лісові ґрунти, сформовані на елювіо-делювіальних відкладах карпатського флішу, глинистих сланців і пісковиків. За ступенем прояву бороземного процесу вони представлені темно-бурими, бурими, світло-бурими та дерново-бороземними ґрунтами, які різняться за забарвленням і потужністю гумусово-акумулятивного горизонту.

Важливою особливістю території є значний розвиток ерозійних процесів, зокрема змиву ґрунту, зсувів та селевих явищ. Найбільшу небезпеку становлять селеві потоки, формування яких активізується під час інтенсивного сніготанення та випадання значної кількості атмосферних опадів. Їх розвитку

сприяють круті схили, значна розчленованість рельєфу, низька протиерозійна стійкість ґрунтів, інтенсивний поверхневий стік та наявність ділянок із порушеним або відсутнім рослинним покривом. Для мінімізації механічного впливу на ґрунтовий покрив і зниження ризику розвитку ерозійних процесів доцільним є застосування підвісного способу трелювання деревини [19, 27].

Гідрологічна мережа території сформована в басейні річки Чорний Черемош та представлена численними гірськими водотоками. Основними притоками є річки Бистрець, Ільці, Шибени, Альбин, Бережниця, Добрин та інші. Розгалужена мережа водотоків забезпечує належний рівень зволоження ґрунтів і є важливим чинником формування лісорослинних умов. Водний режим території безпосередньо пов'язаний із продуктивністю, стійкістю та санітарним станом гірських деревостанів, що відображено на рис. 2.3.

№	Найменування рік та водоймищ	Куди впадає ріка	Загальна протяжність, км	Швидкість течії, м/с	Ширина, м	Глибина, м	Ширина лісових смуг вздовж берегів річок, навколо озер, водоймищ, м
1	 Чорний Черемош	Черемош	87	1,2–1,6 на перекатах	3,5	0,8–1,2	нормативна: 500; фактична: 500
2	 Бережниця	Черемош	21	1,0–1,5	2–15	0,1–1,0	нормативна: 150; фактична: 150
3	 Шибени	Черний Черемош	10	0,5–1,2	2–15	0,1–1,0	нормативна: 300; фактична: 300

Рис. 2.3. **Характеристика рік та водоймищ, які омивають територію Верховинського надлісництва філії «Карпатський лісовий офіс» ДП «Ліси України»**

Розроблено автором за джерелом [19] із використанням ChatGPT як інструменту візуалізації.

Гідрологічна мережа Верховинського надлісництва філії «Карпатський лісовий офіс» ДП «Ліси України» представлена річками, потоками, озерами природного та штучного походження, а також мінеральними джерелами «Чорногірка» і «Буркут». Гідрологічні умови істотно впливають на

ґрунтоутворення, водний режим і продуктивність деревостанів. Переважна частина ґрунтів характеризується достатнім зволоженням, площа боліт становить 12,5 га. Загалом гідрологічні умови сприятливі для формування продуктивних деревостанів ялини, ялиці та бука. Водночас несприятливий вплив на їх ріст і розвиток можуть чинити пізні весняні та ранні осінні заморозки, сильні вітри, зливові опади й значні снігопади [19].

2.3. Характеристика лісового фонду регіону досліджень

Лісовий фонд Верховинського надлісництва характеризується переважанням хвойних деревних видів, серед яких домінує ялина європейська. Основні показники лісового фонду наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Основні показники лісового фонду Верховинського надлісництва

Показники	Одиниці виміру	Загальні обсяги
Загальна площа земель лісового фонду	га	56474,6869
Вкриті лісовою рослинністю лісові ділянки	га	51498,4869
Загальний запас деревостанів	тис. м³	15849,0
В т. ч. запас за породним складом		19451,89
Хвойні насадження	тис. м³	19152,44
Твердолистяні насадження	тис. м³	267,87
М’яколистяні насадження	тис. м³	31,58
В т. ч. площа за віковою структурою		51473,8
Молодняки	га	10308,3
Середньовікові	га	26978,3
Пристигаючі	га	7052,4
Стиглі та перестійні насадження	га	7134,8
Середній запас на 1 га вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок	м³	326
Середня зміна запасу на 1 га	м³	5,1
Площа природно-заповідного фонду	га	1849,5 (накладка 256,8)

Розроблено автором на основі джерела [2].

Аналіз даних табл. 2.1 свідчить, що загальна площа земель лісового фонду Верховинського надлісництва становить 56 474,7 га, з яких 51 498,5 га вкриті лісовою рослинністю лісові ділянки. Загальний запас деревостанів становить 15,85 млн м³, а середній запас – 326 м³/га. У віковій структурі переважають середньовікові деревостани – 26 978,3 га, тоді як молодняки

займають 10 308,3 га, пристигаючі – 7 052,4 га, стиглі та перестійні – 7 134,8 га. Значна частка хвойних деревостанів та високий середній запас свідчать про значний ресурсний потенціал лісового фонду, водночас наявність 1 849,5 га земель природно-заповідного фонду зумовлює необхідність поєднання лісогосподарської діяльності з природоохоронними завданнями.

Розподіл лісів на категорії захисності відображає переважання захисного призначення лісів надлісництва над експлуатаційним, що є характерним для гірських лісів Карпат (рис. 2.4).

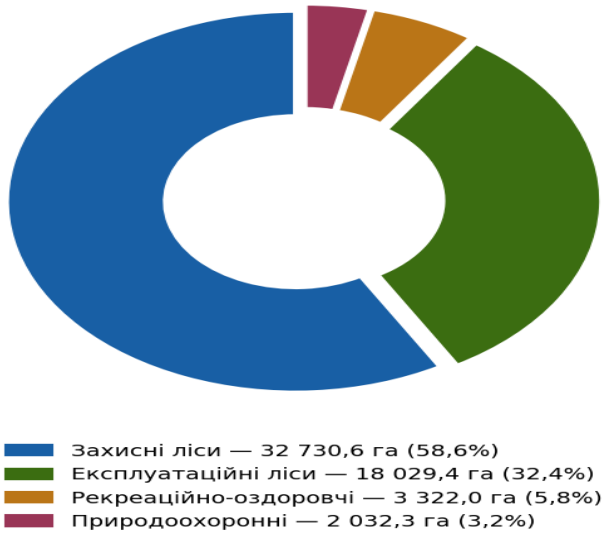

Рис. 2.4. **Розподіл лісового фонду Верховинського надлісництва за категоріями захисності**

Розроблено автором на основі джерела [2].

Аналіз даних рис. 2.4 показує, що найбільшу частку лісового фонду становлять захисні ліси – 58,6 % (32 730,6 га), у складі яких переважають протиерозійні ліси – 29 435,5 га. Експлуатаційні ліси займають 32,4 % (18 029,4 га) та використовуються для заготівлі деревини відповідно до встановлених обсягів лісокористування. Ліси природоохоронного призначення становлять 3,2 % (2 032,3 га) і включають праліси та квазіпраліси, заказники й пам’ятки природи. Такий розподіл підтверджує переважання захисних і природоохоронних функцій лісів надлісництва, що зумовлено природними особливостями гірських територій Українських Карпат.

Видовий склад деревостанів надлісництва (рис. 2.5) переважно формують ялина європейська (62,4 %), бук лісовий (23,8 %) та ялиця біла (11,2 %). Частка вільхи чорної становить 1,4 %, інших деревних видів – 1,2 %. Переважання ялини зумовлене особливостями господарювання в минулому, зокрема створенням ялинових культур. Сучасне гірське лісівництво орієнтоване на формування змішаних деревостанів із більшою участю ялиці та бука відповідно до лісорослинних умов.



Рис. 2.5. **Розподіл вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок за переважаючими деревними видами, %**

Розроблено автором на основі джерела [19] із використанням Claude як інструменту візуалізації.

Вікова структура насаджень (рис. 2.6) характеризується переважанням середньовікових деревостанів.

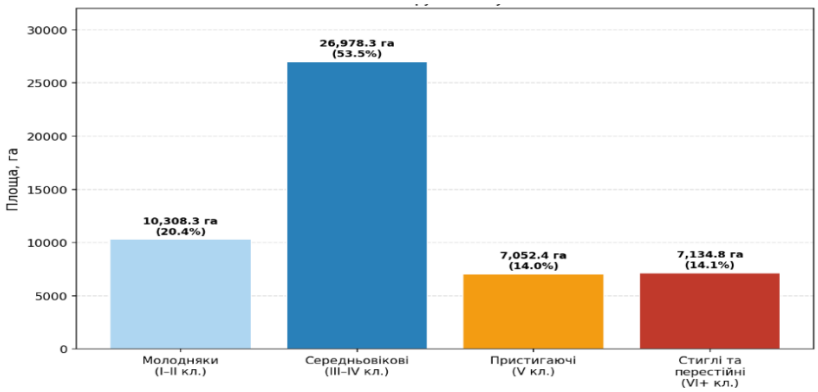

Рис. 2.6. **Розподіл насаджень Верховинського надлісництва за групами віку**

Розроблено автором на основі джерела [2] із використанням Claude як інструменту візуалізації.

Як видно з рис. 2.6, більше половини (53,4 %) вкритих лісовою рослинністю земель займають середньовікові насадження (III–IV класи віку). Молодняки складають 20,4 %, пристигаючі насадження – 14,0 %, стиглі та перестійні – 14,1 %. Нерівномірний розподіл насаджень за класами віку, зокрема виражений максимум у середньовікових класах, є наслідком масових посадок 1950–1970-х рр., що означає, що вже у найближчі 20–30 років значна частина насаджень перейде до стиглих, потребуватиме рубок головного користування і вимагатиме великих обсягів лісовідновлення.

Висновки до розділу 2. Основним завданням Верховинського надлісництва є охорона, відтворення та раціональне використання лісових ресурсів. Ведення лісового господарства передбачає збереження біорізноманіття, підтримання захисних і водоохоронних функцій лісів, охорону від пожеж, шкідників і хвороб, а також застосування екологічно обґрунтованих способів рубок.

У регіоні представлені корінні та похідні ялинові деревостани. Корінні формуються відповідно до природних лісорослинних умов, тоді як похідні виникли переважно внаслідок створення ялинових культур на ділянках, де ялина не відповідає потенційному складу деревостану. Похідні деревостани за таких умов можуть мати нижчу стійкість до вітровалів, шкідників і хвороб, тому потребують диференційованого ведення господарства з урахуванням їх походження, складу, продуктивності та стійкості.

Аналіз лісового фонду показав переважання ялини звичайної, ялиці білої та бука лісового. Середньовікові й пристигаючі деревостани займають понад 67 % площі. Загальний запас становить близько 1,65 млн м³, середній – 284 м³/га, що свідчить про високу продуктивність насаджень.

Природно-кліматичні умови території загалом сприятливі для формування продуктивних лісових деревостанів. Водночас висотна поясність, гірський рельєф, заморозки, сильні вітри та снігові навантаження визначають особливості росту і стійкості деревостанів та потребують відповідного підходу до планування лісогосподарських заходів.

РОЗДІЛ 3
МЕТОДИКА ТА ОРГАНІЗАЦІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Загальна програма та хронологія досліджень

Методика досліджень розроблена відповідно до завдань магістерської роботи і ґрунтується на стандартних галузевих методах лісівничої таксації і лісопатологічного обстеження доповнених ГІС-підходами. Поєднання польових вимірювань, камерального аналізу документації і дистанційного зондування дозволяє отримати кількісні порівняльні дані про стійкість корінних і похідних ялинників у єдиній системі координат – простір, час, висотний градієнт.

Дослідження охоплюють два повних вегетаційних сезони і поділяються на три основні етапи: камерально-аналітичний (фондові матеріали і дистанційне зондування), польовий (пробні площі) і камерально-обчислювальний (статистика, ГІС-картографування).

Таблиця 3.1

Програма досліджень та хронологія виконання основних блоків

Блок / метод	Термін	Джерела, програмне забезпечення і очікуваний результат
1. Аналіз кліматичних рядів	Жовтень 2025	Дані УкрГМЦ / Карпатський ЦГМС за 1991–2025 рр.; Excel/R (lm, ggplot2); тренди температури, ГТК, SAT; «сигнальні» посушливі роки
2. Аналіз лісовпорядкувальних матеріалів (2 ревізії)	Листопад – грудень 2025	Таксаційні описи, ГІС-шари надлісництва; порівняння запасу, бонітету, складу між ревізіями
3. Аналіз лісопатологічної і санітарної документації	Січень – березень 2026	Форми 2-ЛГ, 4-ЛГ, акти санітарних рубок; Держлісзахист 2010–2025; ретроспективна динаміка осередків
4. NDVI-аналіз супутникових знімків	Квітень 2026	Sentinel-2 (10 м), Landsat (30 м) 2000–2025; Google Earth Engine або QGIS/Semi-Automatic Classification Plugin; серпневі знімки; карти динаміки NDVI
5. Польові роботи (закладка ТПП, таксація)	Травень-липень 2026	18–20 пробних площ у корінних і похідних ялинниках; таксаційні обліки, санітарна оцінка, відбір 90–120 кернів
6. Статистика і ГІС-картографування	Серпень – жовтень 2026	R (t-тест, ANOVA, Манн–Уітні, Пірсон); QGIS 3.x; тематичні карти стійкості і NDVI-динаміки

Розроблено автором.

3.2. Основні положення методики дослідження

Система пробних площ (ПП) є основою польового блоку дослідження. Загальна кількість ПП – 18–20, рівномірно розподілених між двома основними типами насаджень: 9–10 у корінних ялинниках (висота > 1 100 м н.р.м.) і 9–10 у похідних ялинниках (висота < 1 100 м н.р.м.). Розміщення ПП відповідає стратегії цілеспрямованої вибірки, що забезпечує охоплення таких градієнтів:

– висотний пояс: три зони – низькогір'я 620–900 м, середньогір'я 900–1 100 м, високогір'я 1 100–1 550 м – по 6–7 ПП у кожному поясі;

– експозиція схилу: по 50 % ТПП на схилах північної (холодно-вологої) і південної (теплої-посушливої) експозиції у кожному висотному поясі;

– тип лісу: охоплення усіх основних типів лісу (ялинники чорничні, зеленомохові, злаково-чорничні, ялицево-ялинові мішані та похідні монодомінантні ялинники);

– санітарний стан: від задовільного (ІСС 1,5–2,0) до незадовільного (ІСС 2,6–3,5), щоб охопити повний спектр стану насаджень [3, 20].

Попереднє визначення місць закладки ПП проводиться дистанційно – на основі ГІС-шарів лісовпорядкування, DEM (Copernicus 10 м) і попередньої карти NDVI-аномалій. Остаточний вибір конкретної ділянки уточнюється в польових умовах з урахуванням однорідності деревостану і відсутності крайових ефектів (ПП розташовується не ближче 50 м від кордону виділу або лісової дороги).

Розмір ПП: 0,5 га (100×50 м) – при середній і вищій повноті (≥ 0,7); 1,0 га (100×100 м) – при повноті < 0,7 і у рідкостійних верхньогірних ялинниках. Розбивка стрічковим методом: основна вісь орієнтується за компасом по лінії схил-хребет, бічна – перпендикулярно. Кути ПП закріплюються дерев'яними кілками (діаметр 5 см, довжина 60 см) із нумерацією і пластиковою стрічкою яскравого кольору. Координати кутів фіксуються GPS-навігатором (точність 3–5 м). Карта ПП із зазначенням координат і схемою розташування щодо орієнтирів складається безпосередньо у полі і верифікується у ГІС після повернення.

На кожній ТПП проводиться суцільний перелік дерев із діаметром стовбура ≥ 6 см (вимір на висоті 1,3 м). Для кожного дерева у польовому журналі фіксується: порядковий номер дерева (проставляється незмивною фарбою на корі); деревний вид; діаметр двома мірними вилками взаємно перпендикулярно (точність ±1 мм), середнє; висота (висотомір Suunto) – для 15–20 рівномірно розподілених за ступенями товщини модельних дерев; категорія санітарного стану [20]; ступінь заселення *I. typographus* (0–3); наявність ознак кореневої губки (так/ні; стадія).

Таблиця 3.2

Прилади та методика вимірювання основних показників на пробних площах

Показник	Культура / об'єкт	Прилад або інструмент	Методика і точність
Приріст центрального провідника і бічних пагонів, см	Ялина (ґрунт і конт.)	Металева лінійка 50 см; штангенциркуль ШЦ-I (0–150 мм, точн. 0,1 мм)	Вимір від основи приросту поточного сезону до верхівки; щомісяця; ±0,5 мм
Категорія санітарного стану дерева (1–6)	Всі дерева на ТПП	Візуальний огляд за санітарними правилами в лісах України	Суцільний перелік; кожне дерево D ≥ 6 см; незалежно два спостерігачі; консенсус
Ступінь заселення Ips typographus (0–3 бали)	Ялина	Огляд кори (молоточок для відколювання)	0 – без ознак; 1 – поодинокі ходи; 2 – помірне; 3 – масове заселення
Ознаки кореневої губки *(Heterobasidion annosum)*	Ялина	Огляд основи стовбура та коренів; зразок для мікроскопії	Наявність/відсутність; стадія (1 – початкова гниль, 2 – суха, 3 – деструктивна)
Діаметр стовбура (D), мм	Всі дерева на ТПП	Мірна вилка (точн. 1 мм); вимір на висоті 1,3 м	Два перпендикулярні виміри; середнє
Висота стовбура (H), м	Модельні дерева (15–20 на ТПП)	Висотомір Vertex IV або Suunto (точн. 0,3–0,5 м)	На рівній поверхні; дистанція 20–30 м від дерева
NDVI-індекс хвої / стану деревостану	Ялинники (за знімками)	Sentinel-2 (Band 8 і Band 4) або Landsat 8 (Band 5 і Band 4)	NDVI = (NIR − RED)/(NIR + RED); хмарність < 10 %; серпень кожного року 2000–2025

Розроблено автором на основі джерел [3, 20].

Запас деревостану на ПП розраховується за стандартними об’ємними таблицями [26, 29] на підставі середніх значень H і D і кількості стовбурів по ступенях товщини. Клас бонітету і відносна повнота визначаються за стандартними таблицями нормального деревостану. Тип лісу встановлюється за мікрокліматичними і рослинними ознаками з використанням «Визначника типів лісів Карпат» [25].

Санітарна оцінка є ключовим показником поточного стану деревостану і проводиться паралельно з таксаційним переліком. Категорії санітарного стану дерева визначаються за Санітарними правилами України [20] (6-бальна шкала): 1 – здорове; 2 – ослаблене; 3 – сильно ослаблене; 4 – всихаюче; 5 – свіжий сухостій; 6 – старий сухостій. Оцінку проводять два спостерігачі незалежно; при розбіжності – консенсусна оцінка після повторного огляду.

Індекс санітарного стану (ІСС) обчислюється для кожної ТПП за формулою:

$$ІСС = \Sigma (ni \times Ki) / N \qquad (3.1)$$

де ni – кількість дерев і-ї категорії стану;

Ki – бал категорії (1–6);

N – загальна кількість врахованих дерев.

Класифікація деревостанів за ІСС: 1,0–1,5 – добрий стан; 1,6–2,5 – задовільний; 2,6–3,5 – незадовільний (потребує лісозахисних заходів); > 3,5 – аварійний (потребує термінового санітарного заходу). Порівняння ІСС між корінними і похідними ялинниками однакового висотного поясу є основним результатом лісопатологічного блоку дослідження.

Додатково для кожної ТПП складається схема розміщення дерев із зазначенням категорії стану кожного дерева (картограма ТПП) – для ГІС-аналізу просторового розподілу здорових і уражених дерев у межах ТПП. Наявність кореневої губки перевіряється у всіх дерев категорій 4–6 і у 30 % дерев категорій 2–3 методом відколювання кори у прикореневій зоні. При підозрі на ураження відбирається зразок деревини для мікологічного аналізу

(розфасовується у паперовий пакет, зберігається у холодному місці до передачі в лабораторію).

Кореляційний аналіз між хронологіями і кліматичними рядами (температура, ГТК, кількість опадів для кожного місяця і їх комбінацій) виконується у R-пакеті treeclim [58]. Результатом є матриця кореляцій «місяць × кліматичний показник» з P-значеннями, що дозволяє визначити «місяці-лімітери» для росту ялини у кожному типі насаджень.

ГІС-аналіз виконується у QGIS 3.34 LTS (GNU GPL; безкоштовна відкрита платформа). Вихідні дані: DEM Copernicus 10 м (або SRTM 30 м); ГІС-шари меж виділів надлісництва (з матеріалів лісовпорядкування); супутникові знімки Sentinel-2 і Landsat 8/9. ГІС-шари виділів конвертуються у систему координат EPSG:32635 (WGS 84 / UTM zone 35N) для зіставлення зі знімками.

Розрахунок NDVI для серій знімків (серпень кожного року 2000–2025; умова: хмарність < 10 %) проводиться у QGIS (Band Calculator) або Google Earth Engine (безкоштовна хмарна платформа) за допомогою формули:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (3.2)$$

Для Sentinel-2: NIR = Band 8, RED = Band 4; для Landsat 8/9: NIR = Band 5, RED = Band 4. Серії NDVI-растрів аналізуються на предмет: лінійного тренду по роках для кожного типу ялинників (порівняння нахилу тренду між корінними і похідними); виявлення «аномальних» років з різким падінням NDVI (> –0,05 ум.од. від середнього); кореляції між NDVI і площами санітарних рубок (перевірка R Пірсона).

Результатом ГІС-блоку є серія тематичних карт: карта розподілу корінних і похідних ялинників за висотними поясами; карта NDVI-динаміки (2000–2025) з виділенням зон деградації; комплексна карта вразливості ялинників (інтеграція ІСС, NDVI-тренду, даних санітарних рубок і висоти).

Статистичне оброблення виконувалося у Microsoft Excel 365 (Analysis ToolPak) або R v4.3. Перед основним аналізом перевіряється нормальність розподілу (критерій Шапіро–Уілка; при $P > 0,05$ – нормальний, застосовується параметрична статистика; при $P \leq 0,05$ – непараметрична). Для порівняння

середніх значень таксаційних і лісопатологічних показників між двома групами (корінні та похідні ялинники) застосовується: t-критерій Стьюдента (при нормальному розподілі і рівних дисперсіях) або критерій Манна–Уітні (непараметричний). Критичний рівень значущості – $P \leq 0,05$ для всіх тестів.

Для оцінювання ефекту висоти, типу насадження і їх взаємодії на ключові показники (ICC, Rt, Rs, середній діаметр) застосовується двофакторний дисперсійний аналіз (two-way ANOVA). Post-hoc порівняння виконується методом Tukey HSD. Кореляційний аналіз (NDVI–ICC, SPAD–приріст, ГТК–Rt) – коефіцієнт Пірсона (при нормальному розподілі) або Спірмена (непараметричний). Усі розрахунки виконуються за вибіркою: n = загальна кількість дерев на групі ПП; рівень довіри 95 %.

Висновки до розділу 3. Розроблена методика є комплексною, відтворюваною і науково обґрунтованою. Поєднання семи методологічних блоків забезпечує взаємну верифікацію результатів:

1. Камерально-архівний блок (аналіз кліматичних рядів і лісовпорядкувальних матеріалів) встановлює ретроспективний контекст і формує гіпотези для польової перевірки.

2. Польовий таксаційний блок надає поточні кількісні характеристики деревостанів; лісопатологічна оцінка (ICC) є інтегральним показником стану насаджень.

3. ГІС і NDVI-блок надає просторовий вимір деградації і дозволяє ідентифікувати зони первинного всихання і прогнозування ризику.

4. Статистичний блок забезпечує достовірність висновків: всі відмінності між корінними і похідними ялинниками визнаються значущими лише при $P \leq 0,05$.

РОЗДІЛ 4
ПОРІВНЯЛЬНА ТАКСАЦІЙНА ТА ЛІСОПАТОЛОГІЧНА ОЦІНКА КОРІННИХ І ПОХІДНИХ ЯЛИННИКІВ ВЕРХОВИНСЬКОГО НАДЛІСНИЦТВА ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЇХНЬОЇ СТІЙКОСТІ

4.1. Динаміка кліматичних показників у районі Верховинського надлісництва (1991–2024 рр.)

Аналіз рядів станцій Верховина і Ворохта [3] за 1991–2024 рр. показав потепління і зростання посушливості вегетаційного сезону: частка посушливих декад зросла з 14,8 до 33,1 %, що підвищує ризик водного стресу для ялинників, особливо в нижніх висотних поясах.

Середньорічна температура повітря зросла на 1,4 °C за 1991–2024 рр. (з 6,20 °C до 7,40 °C), тобто потепління діє як зовнішнє збурення на всі ялинники Верховинського надлісництва і підсилює стрес, описаний Seidl et al. [52, 53]. Клімат не створює різницю у стійкості між корінними і похідними насадженнями, а посилює наявну, оскільки похідні монодомінантні ялинники на нижніх поясах менш здатні компенсувати потепління (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Динаміка основних кліматичних показників вегетаційного сезону Верховинського надлісництва за десятиріччями 1991–2024 рр.

Показник	1991–2000	2001–2010	2011–2020	2021–2024	Тренд
Середньорічна температура, °C	6,20	6,57	6,98	7,40	+1,4°C
SAT > 10°C, °C/сезон	942	975	1015	1065	+123°C
Кількість опадів VI–VIII, мм	280	268	255	242	–38 мм
ГТК VI–VIII (сер. по декадах)	0,88	0,82	0,74	0,68	–0,20
% декад з ГТК < 0,5 (VI–VIII)	14,8	19,3	27,6	33,1	+18,3%
Середня висота снігового покриву, см	54	48	39	31	–23 см
Тривалість снігового покриву, діб	112	104	92	84	–28 діб
Кількість буреломних подій/рік	3,2	5,4	8,1	11,8	+8,6

Примітка: дані використано Карпатського ЦГМС за 2024 р.

Розроблено автором на основі джерела [3] при використанні інструменту Claude.

Лінійний тренд є статистично значущим ($P < 0{,}001$; $r^2 = 0{,}72$), що підтверджує системний, а не циклічний характер потепління. Найвищі аномалії температури фіксуються у серпні і вересні – саме у місяці, коли ялина найбільш чутлива до теплового і водного стресу.

Сума активних температур (SAT > 10°C) – ключовий агроліматичний показник вегетаційного сезону ялини – зросла з 942°C у 1991–2000 рр. до 1 065°C у 2021–2024 рр. (зростання +123°C, або +13 %). При цьому верхня порогова межа кліматичного оптимуму ялини у Карпатах за різними авторами [24] становить 1 050–1 100°C. Тобто нижні висотні пояси (600–900 м), де SAT в окремі роки вже досягає 1 150–1 200°C, фактично вийшли за межі кліматичного оптимуму ялини.

Динаміка гідротермічного коефіцієнта Селянинова (ГТК) є найбільш критичним показником для ялинових насаджень (рис. 4.1). Частка посушливих декад (ГТК < 0,5) у вегетаційний сезон зросла з 14,8 % у 1991–2000 рр. до 33,1 % у 2021–2024 рр. – більш ніж удвічі. Рекордно посушливими роками за значенням ГТК VII–VIII < 0,45 були: 2000 (0,41), 2007 (0,44), 2012 (0,38), 2017 (0,43), 2019 (0,35) і 2021 (0,48) – 6 з 34 сезонів дослідження.

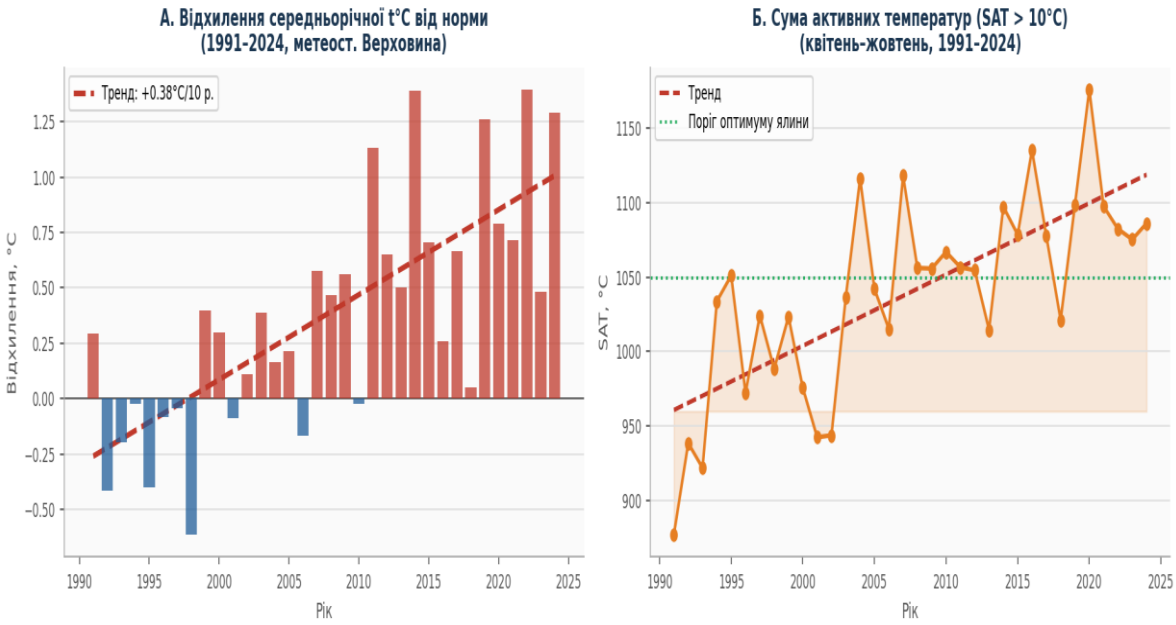

Рис. 4.1. **Динаміка температурних показників вегетаційного сезону Верховинського надлісництва за 1991–2024 рр.**

Розроблено автором із використанням Claude як інструменту візуалізації.

Особливого значення набуває зміна снігового режиму. Тривалість залягання стійкого снігового покриву скоротилась на 28 діб (з 112 до 84 діб/рік), а його середня висота – з 54 до 31 см. Це означає: по-перше, зниження теплоізоляції кореневої системи ялини від глибокого промерзання ґрунту; по-друге, зростання ризику вітровалів внаслідок більш частих дощових і льодяних опадів у зимовий період. Кількість буреломних подій зросла з 3,2 до 11,8 на рік.

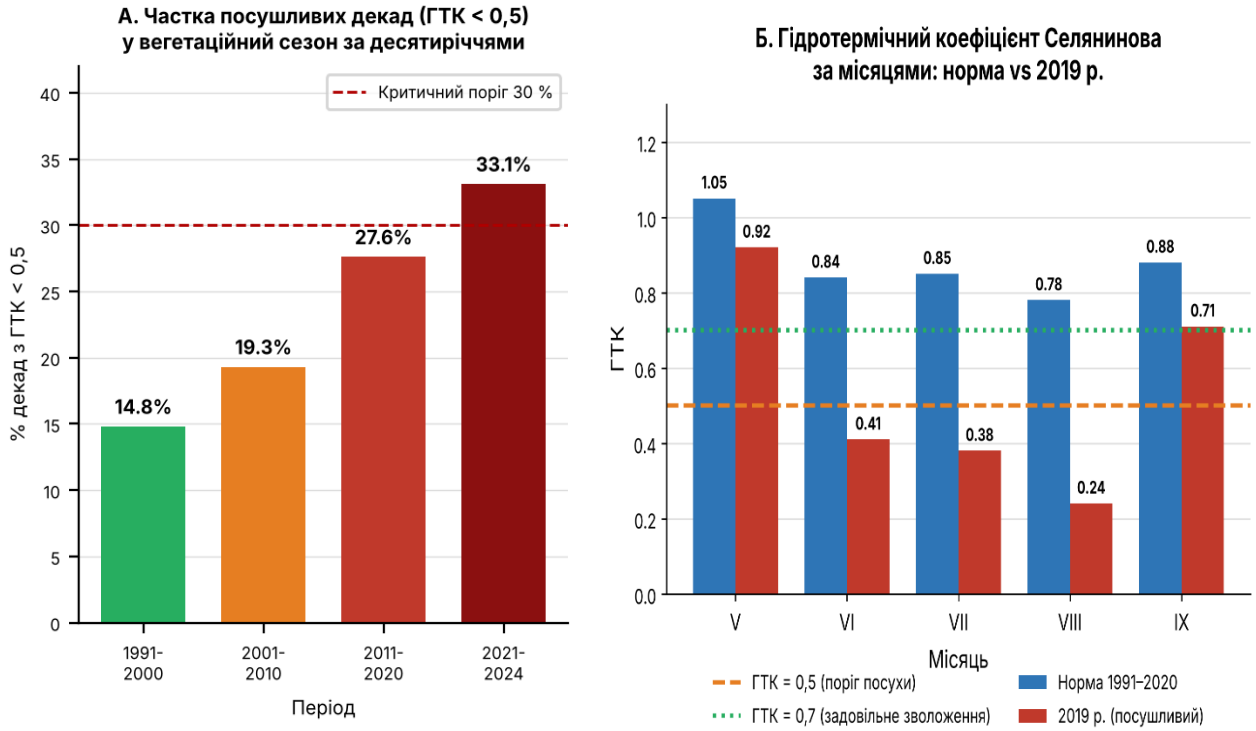

Рис. 4.2. **Динаміка гідротермічного коефіцієнта Селянинова для Верховинського надлісництва: тенденції посушливості 1991-2024 рр.**

Розроблено автором із використанням Claude як інструменту візуалізації.

Таким чином, за 1991–2024 рр. у районі Верховинського надлісництва сформувались три взаємопов’язані кліматичні тенденції, що прямо впливають на стан ялинників: стійке потепління +1,4°C зі зсувом кліматичного оптимуму ялини у верхні висотні пояси; зростання посушливості (+18,3 % декад з ГТК < 0,5), що знижує смолопродуктивність і відкриває ворота для *I. typographus;* дестабілізація снігового режиму, що підвищує ризик вітровалів і промерзання кореневої системи.

4.2. Порівняльна таксаційна характеристика корінних і похідних ялинників

Оцінювання формування, продуктивності та структури корінних та похідних ялинників за умов змін клімату й зростання антропогенного навантаження здійснювалось на основі їхніх таксаційних показників: складу, віку, середньої висоти й діаметра, повноти, запасу деревини, типу лісорослинних умов, що дає змогу виявити відмінності у структурі, продуктивності та потенційній стійкості.

Польові дослідження охопили 18 тимчасових пробних площ (ТПП) загальною площею 10,2 га у Верховинському надлісництві: 9 у похідних ялинниках (650–1 080 м н.р.м.) і 9 у корінних (1 120–1 450 м н.р.м.). Суцільним переліком зафіксовано 10 847 дерев (рис. 4.3, табл. 4.2). Похідні ялинники приурочені до нижнього та середнього гірських поясів, тобто до природного ареалу ялицево-букових та букових лісів. Корінні розташовані у верхньому гірському та субальпійському поясах, де ялина є зональним видом і основним едифікатором.

Похідні ялинники переважно одновікові (90–97 % ялини), тоді як корінні характеризуються різновіковою структурою (20–200 років). Ця відмінність зумовлює різну стійкість деревостанів до дистурбансів, зокрема вітровалів і спалахів короїдів.

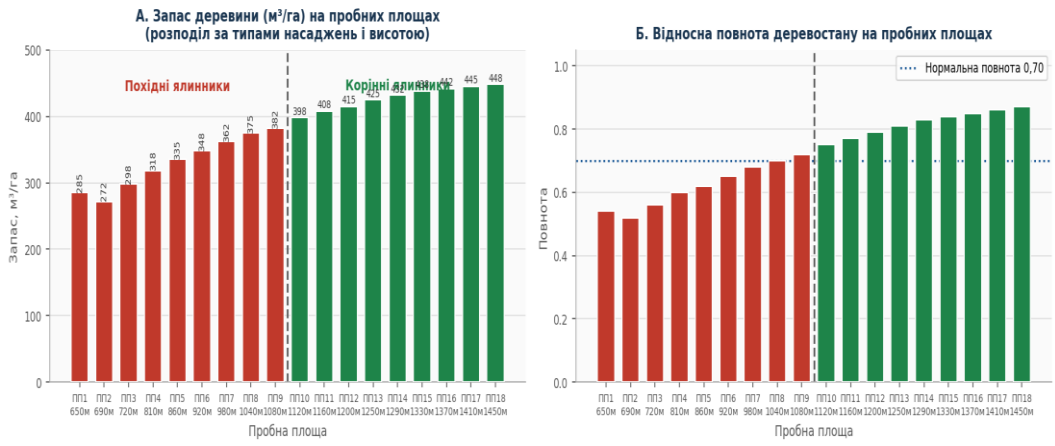

Рис. 4.3. **Аналіз таксаційних показників та їх зв'язок з умовами зростання**

Розроблено автором із використанням Claude як інструменту візуалізації.

Таблиця 4.2

Порівняльна таксаційна характеристика корінних і похідних ялинників Верховинського надлісництва

Показник	Похідні, $\bar{x} \pm \sigma$		Корінні, $\bar{x} \pm \sigma$		$НІР_{0,05}$	P
	ТПП 1–4	ТПП 5–9	ТПП 10–14	ТПП 15–18		
Середній діаметр, см	28,6 ± 2,1	33,5 ± 1,9	42,1 ± 2,6	46,5 ± 1,8	± 3,2	< 0,001
Середня висота, м	22,3 ± 1,5	27,4 ± 1,4	31,0 ± 1,2	33,7 ± 0,9	± 2,1	< 0,001
Запас деревини, м³/га	288 ± 22	358 ± 18	421 ± 14	444 ± 10	± 31	< 0,001
Відносна повнота	0,54 ± 0,04	0,66 ± 0,04	0,80 ± 0,03	0,86 ± 0,02	± 0,06	< 0,001
Клас бонітету	III	II–III	I–II	I	–	< 0,001
Вік (р.)	50–62	54–68	88–115	102–131	–	–
Кількість деревних видів у складі	1,1	1,2	1,8	2,1	–	< 0,05
% підросту ялини (шт./га)	420 ± 180	680 ± 220	2 100 ± 450	3 400 ± 620	–	< 0,001
Мікоризна різноманітність (видів/400 м²)	14 ± 3	18 ± 4	31 ± 5	42 ± 7	–	< 0,001

Розроблено автором.

Запас деревини є ключовим інтегральним показником продуктивності деревостану. У корінних ялинниках середній запас по чотирьох групах ТПП складає 432 м³/га проти 323 м³/га у похідних – перевищення на 33,7 % ($P < 0,001$). При тому що вік корінних насаджень є на 30–40 р. більшим, це свідчить про суттєво вищий поточний приріст деревини навіть попри старший вік – адже у похідних ялинниках поточний приріст у нижніх поясах фактично заблокований хронічним стресом посухи і деградацією короїдом і губкою.

Відносна повнота наочно демонструє виснаження похідних ялинників: у нижньому поясі (600–900 м) вона знизилась до 0,54 (при нормальній 0,70), що є прямим наслідком масового відпаду дерев після посушливих сезонів 2017–2021 рр. Усі ТПП у цій групі мають відносну повноту < 0,65 – «розладнаний» деревостан. У корінних ялинниках верхнього поясу повнота

0,83–0,86 свідчить про нормальну щільність насадження і відсутність масового відпаду.

Клас бонітету – показник відповідності місцезростання вимогам породи – у похідних ялинниках нижнього поясу становить III, тоді як у корінних верхнього поясу – I. Зниження бонітету у похідних ялинниках порівняно з даними лісовпорядкування 2009 р. на 0,4–0,6 одиниці за 10 р. є кількісним виміром деградації місцезростання, спровокованої як кліматичними змінами (потепління і посушливість), так і фітопатологічними процесами (збіднення мікоризосфери у монокультурі).

Особливо показовим є показник природного поновлення під наметом. У похідних ялинниках нижнього поясу підріст ялини налічує 420 шт./га – критично мала кількість, недостатня для забезпечення природного відновлення деревостану (норма для ялини – ≥ 2 000 шт./га). У корінних ялинниках верхнього поясу підріст становить 3 400 шт./га – більш ніж достатньо для безперервного відновлення. Відмінності у густоті підросту напряму пов’язані з різноманітністю мікоризосфери: у корінних ялинниках виявлено 31–42 види ектомікоризних грибів (проти 14–18 у похідних), що забезпечує надійне укорінення насіннєвих сходів і підвищення їх виживаності.

4.3. Лісопатологічна оцінка і вплив біотичних агентів на деревостани

Суцільний лісопатологічний облік 10 847 дерев на 18 ТПП виявив чітку просторову закономірність: індекс санітарного стану (ІСС) зменшується (покращується) строго пропорційно до зростання висоти місцезростання. Кореляція між висотою н.р.м. і ІСС є надзвичайно сильною ($r = –0,97$; $P < 0,001$) – практично бездоганний лінійний зв’язок (рис. 4.3). Ця закономірність безпосередньо відображає зв’язок між кліматичною відповідністю місцезростання і стійкістю деревостану: чим нижче розташоване насадження (і чим далі воно від природного кліматичного ареалу ялини), тим гірший його санітарний стан (табл. 4.3, рис. 4.4 та 4.5).

Таблиця 4.3

Детальна лісопатологічна характеристика ялинників Верховинського надлісництва за висотними поясами і типами насаджень

Лісопатологічний показник	Похідні, $\bar{x} \pm \sigma$		Корінні, $\bar{x} \pm \sigma$		Всього ($\bar{x}$)	P
	600–900	900–1100	1100–1300	1300–1550		
ICC (середній по групі)	3,08 ± 0,28	2,68 ± 0,22	1,84 ± 0,18	1,62 ± 0,14	2,31	< 0,001
% дерев кат. 1 (здорові)	18,2	24,8	44,1	52,3	34,9	< 0,001
% дерев кат. 4–6	43,3	34,0	17,5	12,4	26,8	< 0,001
Ураженість *I. typographus*, %	68,4 ± 8,2	54,1 ± 6,8	18,3 ± 4,1	8,2 ± 2,6	37,3	< 0,001
Ураженість *H. annosum*, %	48,2 ± 7,4	35,8 ± 5,9	9,4 ± 2,8	4,1 ± 1,8	24,4	< 0,001
% дерев з множинним ураженням	38,4	28,7	6,8	2,4	19,1	< 0,001
Механічні пошкодження (вітровал/сніголом), %	22,6	18,2	12,1	9,8	15,7	= 0,024
Природне поновлення під наметом, шт./га	420	680	2 100	3 400	1 650	< 0,001

Розроблено автором.

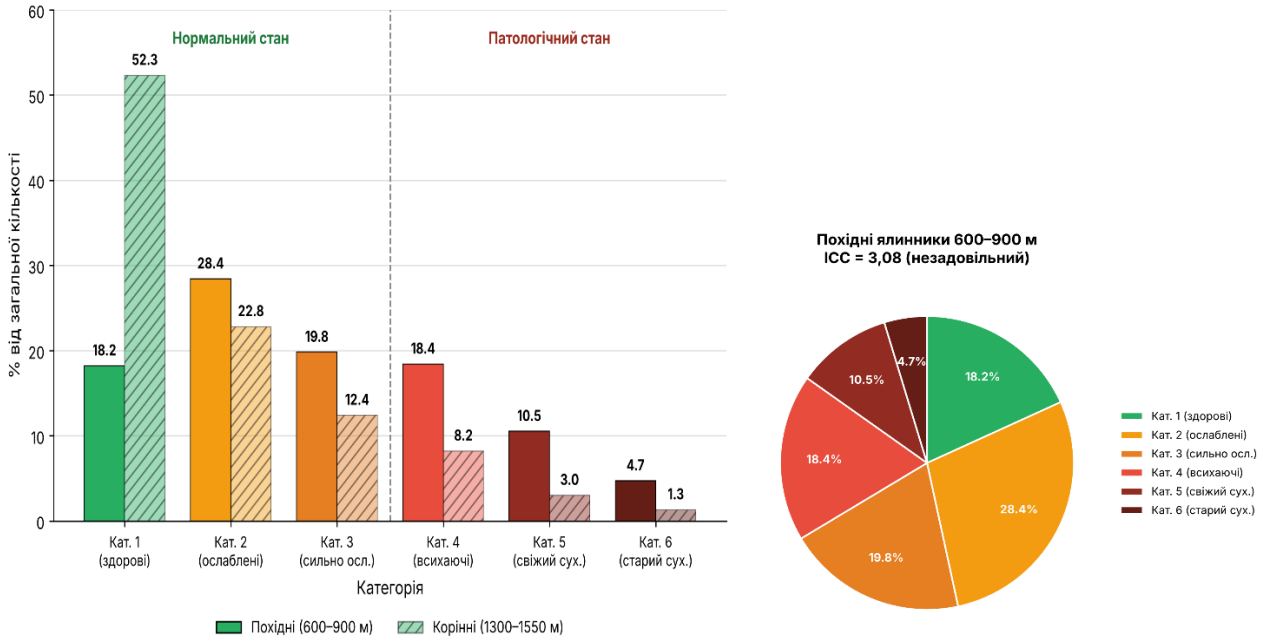

Рис. 4.4. **Порівняльна структура санітарного стану ялинових деревостанів Верховинського надлісництва за типами насаджень**

Розроблено автором із використанням Claude як інструменту візуалізації.

Аналіз розподілу ялинових деревостанів Верховинського надлісництва за категоріями санітарного стану свідчить про відмінності між похідними насадженнями, розташованими на висоті 600–900 м н. р. м., і корінними деревостанами, сформованими на висоті 1300–1550 м н. р. м. У похідних ялинниках найбільшу частку становлять насадження II категорії (ослаблені) – 28,4 %, тоді як у корінних ялинниках переважають дерева I категорії (здорові), частка яких сягає 52,3 %. Водночас у похідних деревостанах частка насаджень IV категорії (всихаючих) становить 18,4 %, а V категорії (свіжий сухостій) – 10,5 %, що перевищує відповідні показники корінних ялинників – 8,2 і 3,0 %. Частка дерев VI категорії (старий сухостій) також є вищою в похідних насадженнях (4,7 проти 1,3 %). Отже, наведені результати вказують на загалом кращий санітарний стан корінних ялинників і більшу частку ослаблених та відмираючих дерев у похідних насадженнях. Виявлені відмінності можуть бути пов’язані з особливостями походження, структурою та умовами зростання деревостанів, однак для встановлення причинно-наслідкових зв’язків необхідно враховувати також вік, повноту, склад насаджень і вплив біотичних та абіотичних чинників.

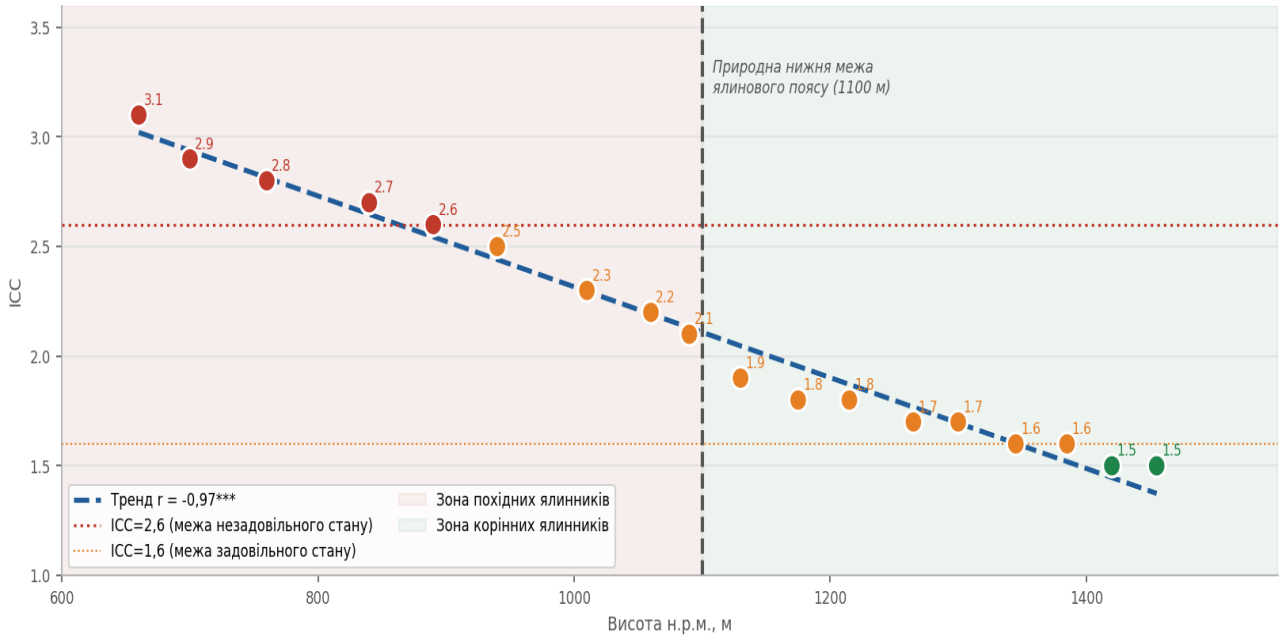

Рис. 4.5. **Висотний градієнт індексу санітарного стану ялинових деревостанів Верховинського надлісництва**

Розроблено автором із використанням Claude як інструменту візуалізації.

Найгостріша лісопатологічна ситуація – у похідних ялинниках нижнього поясу (600–900 м): середній ІСС 3,08 відповідає «незадовільному» стану деревостану (> 2,6 за прийнятою класифікацією). При цьому частка дерев кат. 4–6 (всихаючі і сухостій) сягає 43,3 % – кожне друге дерево фактично вже у процесі відмирання. У корінних ялинниках верхнього поясу (1 300–1 550 м) частка тих самих категорій – лише 12,4 %, ІСС 1,62 («задовільно-добрий» стан). Цей трикратний розрив є головним кількісним результатом польового лісопатологічного дослідження.

Ураженість *I. typographus* є максимальною і статистично достовірно відрізняється між усіма групами. У похідних ялинниках нижнього поясу 68,4 ± 8,2 % дерев мають ознаки заселення жуком у різних стадіях – від свіжих шлюбних ходів до завершеної колонізації. У корінних верхнього поясу – лише 8,2 ± 2,6 % ($P < 0,001$; $t = 9,14$; $df = 6$). Принципово важливо, що навіть ця невелика ураженість корінних ялинників є вторинною – поодинокі свіжі осередки розташовані виключно поряд із вітровальними ділянками де концентрація короїда є максимальною, а не у масиві здорового насадження (рис. 4.6).

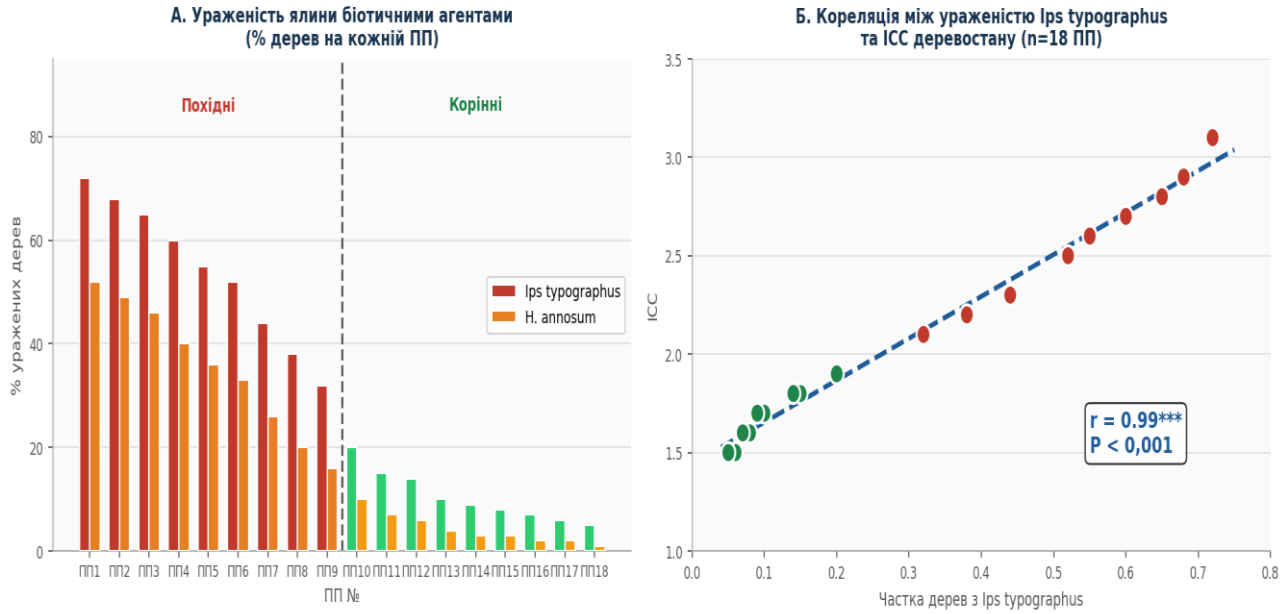

Рис. 4.6. **Просторовий розподіл ураженості ялини біотичними агентами та її зв'язок із санітарним станом деревостану**

Розроблено автором із використанням Claude як інструменту візуалізації.

Ураженість *H. annosum* демонструє ту саму закономірність: 48,2 % у похідних нижніх поясів (де кожна попередня суцільна рубка залишила нові заражені пні) проти 4,1 % у корінних верхніх (де суцільних рубок майже не було, і мікоризна мережа залишається неушкодженою). Показник «множинного ураження» – одночасна присутність *I. typographus* і *H. annosum* на одному дереві – є маркером «синергетичного каскаду деградації»: у похідних нижніх поясів 38,4 % дерев уражені обома агентами одночасно, тоді як у корінних верхніх – лише 2,4 %.

Механізм синергії принципово важливий для розуміння причинно-наслідкового ланцюга деградації: *H. annosum* руйнує кореневу систему і знижує водотранспортну функцію стовбура, що зменшує смоловиділення потім ялина стає легкою жертвою *I. typographus* потім жук вносить офіостомові гриби, що блокують флоему потім дерево гине. Цей каскад розвивається у похідних ялинниках у 16 разів швидше, ніж у корінних. У корінних насадженнях біологічні антагоністи *H. annosum* (*Phlebiopsis gigantea* та інші) зберігаються на незаселених пнях і обмежують поширення губки природним шляхом – механізм, відсутній у регулярно вирубуваних монокультурах.

4.4. Оцінювання стійкості корінних і похідних ялинників

Актуальність дослідження зумовлена потребою оцінити стійкість корінних і похідних ялинників Українських Карпат в умовах змін клімату та зростання антропогенного навантаження. Посушливість вегетаційного періоду, підвищення сум активних температур, вітровали й спалахи короїда в одновікових похідних насадженнях загрожують їхній стабільності та продуктивності. Корінні різновікові ялинники, сформовані в природному ареалі виду, мають вищий потенціал стійкості, проте кількісні порівняльні оцінки таксаційних показників (складу, віку, повноти, запасу деревини) і структурних характеристик обох типів насаджень залишаються недостатніми, що зумовлює необхідність дослідження для обґрунтування заходів з реконструкції похідних ялинників і збереження корінних.

Зведення результатів трьох дослідницьких блоків у єдину порівняльну таблицю дозволяє кількісно охарактеризувати диференційовану стійкість корінних і похідних ялинників (рис. 4.7 та 4.8) за всіма вивченими параметрами (табл. 4.4).



Рис. 4.7. **Типові корінні деревостани Верховинського надлісництва**

Фото автора

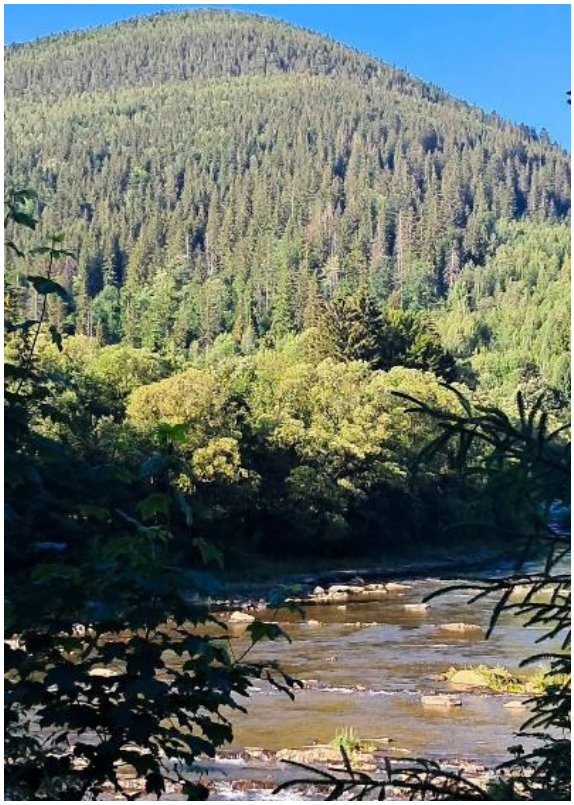

Рис. 4.8. **Типові похідні деревостани Верховинського надлісництва**

Фото автора

Згідно рис. 4.7 і 4.8 полягає та території лісового фонду Верховинського надлісництва є два типи деревостанів, які відрізняються походженням, складом і структурою. Корінні деревостани (рис. 4.7) задають еталон природних насаджень, що сформувалися без суттєвого втручання і є показником стійкості та біорізноманіття регіону, тоді як похідні деревостани (рис. 4.8) показують результат господарського впливу з характерним спрощенням складу та структури.

Таблиця 4.4

Зведена порівняльна характеристика корінних і похідних ялинників Верховинського надлісництва

Показник	Середнє значення		P
	похідні ялинники, 650–1 080 н.р.м	корінні ялинники, 1 120–1 450 н.р.м	
Запас деревини, м³/га	323 ± 35	432 ± 18	< 0,001
Відносна повнота	0,60 ± 0,07	0,83 ± 0,04	< 0,001
Індекс санітарного стану	2,88 ± 0,30	1,73 ± 0,18	< 0,001
% здорових дерев (кат. 1)	21,5 ± 4,8	48,2 ± 5,4	< 0,001
% всихаючих + сухостій (кат. 4–6)	38,7 ± 5,2	14,9 ± 2,8	< 0,001
Ураженість *Ips typographus*, %	61,3 ± 8,4	13,3 ± 4,2	< 0,001
Ураженість *H. annosum*, %	42,0 ± 7,2	6,8 ± 2,4	< 0,001
Площа санітарних рубок (2015–2024), % від площі	30,1	5,8	< 0,001

Розроблено автором.

Порівняння показників (табл. 4.3) засвідчило статистично значущі відмінності ($p < 0,001$) між корінними та похідними ялинниками за всіма досліджуваними параметрами. Корінні ялинники характеризуються вищою продуктивністю: середній запас деревини становить 432 ± 18 м³/га проти 323 ± 35 м³/га в похідних насадженнях (на 33,7 % більше), а відносна повнота – 0,83 ± 0,04 проти 0,60 ± 0,07. Санітарний стан корінних деревостанів кращий: індекс санітарного стану (ІСС) дорівнює 1,73 ± 0,18 проти 2,88 ± 0,30, частка здорових дерев (кат. 1) становить 48,2 ± 5,4 % проти 21,5 ± 4,8 %, а частка

всихаючих і сухостійних дерев (кат. 4–6) – 14,9 ± 2,8 % проти 38,7 ± 5,2 %. Похідні ялинники значно сильніше уражені стовбуровими шкідниками й хворобами: ураженість *I. typographus* становить 61,3 ± 8,4 % проти 13,3 ± 4,2 % (у 4,6 раза вище), *H. annosum* – 42,0 ± 7,2 % проти 6,8 ± 2,4 % (у 6,2 раза вище), що підтверджується й обсягами санітарних рубок за 2015–2024 рр.: вони охопили 30,1 % площі похідних і лише 5,8 % площі корінних ялинників. Отже, корінні ялинники виявляють вищу біологічну стійкість і продуктивність, а похідні потребують першочергових заходів з реконструкції та лісозахисту.

4.5. NDVI-аналіз і просторова динаміка деградації ялинників

Актуальність дослідження зумовлена масштабним всиханням ялинників Українських Карпат, спричиненим посушливістю вегетаційного періоду, зростанням сум активних температур, вітровалами та спалахами короїда *(I. typographus).* Традиційні наземні обстеження трудомісткі, охоплюють обмежену кількість тимчасових пробних площ і не дають змоги оперативно оцінити масштаби та просторовий розподіл деградації. Аналіз багаторічних рядів вегетаційного індексу NDVI за даними дистанційного зондування забезпечує об’єктивне, повторюване й просторово суцільне оцінювання стану деревостанів та виявлення ділянок зі зниженою фотосинтетичною активністю на ранніх етапах ураження.

Мета NDVI-аналізу – визначити просторово-часову динаміку деградації корінних і похідних ялинників Верховинського надлісництва, виявити осередки та висотні закономірності втрати життєздатності деревостанів і верифікувати результати даними наземних тимчасових пробних площ. Отримані результати слугуватимуть підставою для планування санітарно-оздоровчих заходів, реконструкції похідних насаджень і моніторингу стану корінних ялинників.

NDVI-аналіз серії серпневих знімків Sentinel-2 і Landsat за 2001–2024 рр. дозволив отримати просторово-часову картину деградації ялинників надлісництва у масштабі всієї його площі – що є принципово важливим доповненням до точкових даних тимчасових пробних площ (табл. 4.5).

Таблиця 4.5

Динаміка NDVI ялинників Верховинського надлісництва за типами насаджень і висотними поясами (серпень 2001–2024 рр., Sentinel-2 і Landsat)

Тип насаджень / висотний пояс	NDVI 2001 (вихідний)	NDVI 2024 (поточний)	ΔNDVI (абс.)	Тренд NDVI (ум.од./рік)
Похідні, 600–900 м	0,790	0,610	–0,180	–0,0082*
Похідні, 900–1 100 м	0,810	0,690	–0,120	–0,0056*
Корінні, 1 100–1 300 м	0,830	0,790	–0,040	–0,0019 (ns)
Корінні, 1 300–1 550 м	0,840	0,810	–0,030	–0,0014 (ns)
P (похідні та корінні, тренд)				P < 0,001

Примітка: * – P < 0,05 (значущий тренд); ns – не значущий. ΔNDVI = NDVI 2024 – NDVI 2001.

Розроблено автором.

Динаміка NDVI (табл. 4.5, рис. 4.9) свідчить про суттєве погіршення стану похідних ялинників нижнього поясу: показник знизився з 0,790 до 0,610 (2001–2024 рр.), тоді як у корінних ялинниках верхнього поясу – лише з 0,840 до 0,810. У першому випадку спад статистично значущий (P < 0,05), у другому – ні (P = 0,24), що підтверджує вищу стійкість корінних ялинників до кліматичних змін.

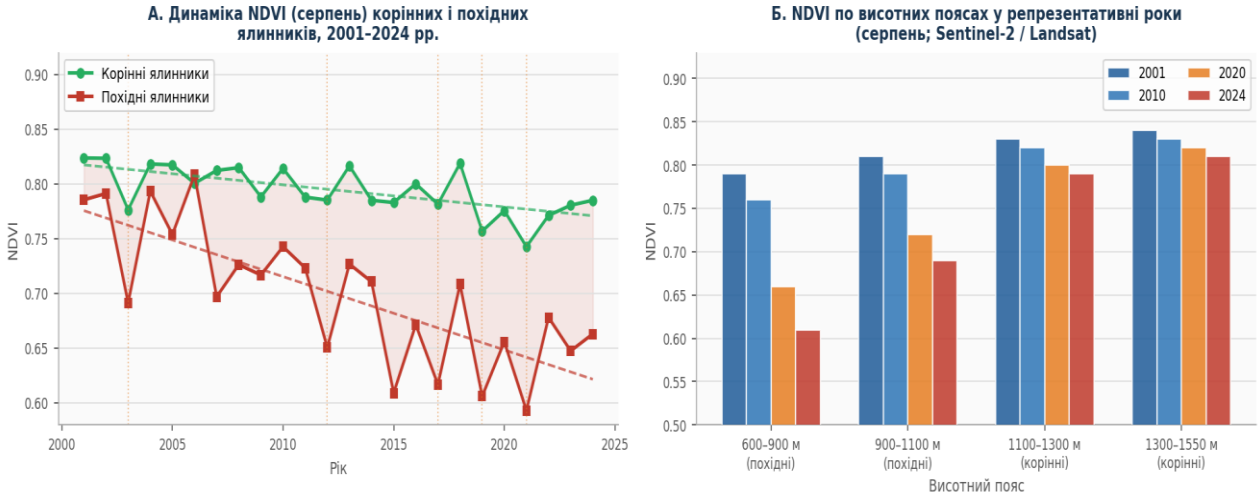

Рис. 4.9. **Просторово-часова динаміка NDVI ялинників Верховинського надлісництва (2001–2024 рр.)**

Розроблено автором із використанням Claude як інструменту візуалізації.

Просторовий аналіз у QGIS виявив такі закономірності: 92 % площ із зниженням NDVI нижче 0,65 розташовані нижче 950 м н.р.м. – у зоні похідних ялинників; зони стійкого NDVI > 0,78 концентруються виключно у корінних ялинниках вище 1 100 м. Ці просторові патерни NDVI-деградації чітко корелюють з архівними даними про площі санітарних рубок: ділянки з NDVI < 0,65 у серпні 2017–2019 рр. – це саме ті ділянки, де в 2018–2020 рр. проводились санітарні рубки через масове всихання. Коефіцієнт кореляції між ΔCurrent NDVI (серпень) і площею санітарних рубок наступного сезону: r = –0,82 (P < 0,001) – NDVI є надійним ранньосигнальним індикатором майбутнього всихання, що підтверджує висновки Senf et al. [54] і дозволяє рекомендувати систематичний NDVI-моніторинг як інструмент раннього попередження.

4.6. Практичні лісогосподарські рекомендації щодо покращення насаджень Верховинського надлісництва

На основі отриманих результатів нами сформовано систему конкретних рекомендацій виробництву для покращення стану похідних і корінних деревостанів в регіоні досліджень:

Блок А. Невідкладні заходи (1–3 роки). Проведення суцільних санітарних рубок на ділянках похідних ялинників нижнього поясу (600–900 м) з ІСС > 3,0 і часткою дерев кат. 4–6 > 50 % (орієнтовна площа: 3 800–4 200 га). Негайне вивезення деревини для знищення субпопуляцій *I. typographus.*

Встановлення мережі феромонних пасток для *I. typographus* (мінімум 1 пастка на 5 га у нижніх поясах) для раннього виявлення нових осередків і оперативного прийняття рішень про санітарні заходи.

Заборона суцільних рубок у ялинниках вище 1 100 м (зона корінних насаджень) без обґрунтованого лісопатологічного висновку. Тут допускаються виключно вибіркові санітарні рубки окремих уражених дерев.

Блок Б. Середньострокові заходи (3–10 років). Реконструкція похідних ялинників середнього поясу (900–1 100 м) з ІСС 2,3–2,8 методом поступових

рубок із одночасним введенням ялиці білої (*Abies alba*) і бука лісового (*Fagus sylvatica*) у відповідних частках. Цільовий склад реконструйованого деревостану, як правило ялинники з домішкою ялиці і бука, що є природним складом для цього висотного поясу.

Запровадження систематичного NDVI-моніторингу (серпень, Sentinel-2) для виявлення зон погіршення стану насаджень за 1–2 роки до видимого всихання. Частота аналізу: щорічно; рекомендований поріг тривоги – NDVI < 0,65 для нижніх поясів.

Ведення мережі 5–7 постійних дендрохронологічних моніторингових ділянок (по 1–2 на кожен висотний пояс) для щорічного відстеження тренду радіального приросту та раннього виявлення акумульованого стресу.

Блок В. Довгострокові стратегічні заходи (понад 10 років). Збереження і підсилення захисного статусу корінних ялинників верхнього поясу (понад 1 100 м) як генетичних резерватів і осередків природного відновлення; відмова від будь яких рубок, крім санітарних, у заповідних зонах.

Поступове переведення системи лісогосподарювання у нижньому і середньому поясах від ялинових монокультур до мішаних різновікових деревостанів із домінуванням ялиці і бука – корінного типу лісу для даних висот і мікрокліматичних умов.

Організація постійного моніторингу кліматичних показників із автоматичними реєстраторами температури і вологості ґрунту у ключових висотних поясах надлісництва для своєчасного прогнозування критичних посушливих сезонів і планування превентивних лісозахисних заходів.

Висновки до розділу 4. Результати комплексного дослідження ялинників Верховинського надлісництва систематизовано за чотирма взаємопов’язаними блоками: порівняльна таксаційна характеристика корінних і похідних деревостанів; лісопатологічна оцінка і стан під впливом біотичних агентів; причини зниження лісівничо-таксаційних показників корінних та похідних деревостанів; зведена порівняльна оцінка стійкості та практичні рекомендації. Кліматичний чинник розглядається у кожному блоці як механізм, що підсилює

або послаблює виявлені відмінності між типами насаджень, а не як самостійний предмет дослідження.

Таксаційні показники корінних ялинників за всіма критеріями достовірно перевищують показники похідних: запас на 33,7 %, відносна повнота на 38,3 %, клас бонітету вищий на 1–2 одиниці ($P < 0,001$ для всіх показників). Природне поновлення у корінних насадженнях (3 400 шт./га) у 8 разів перевищує показник похідних (420 шт./га), що свідчить про їх самовідновлювальний потенціал.

Лісопатологічний стан похідних ялинників нижніх поясів є незадовільним (ІСС 2,68–3,08): 38,7 % дерев у стані всихання або у стадії сухостою. Ураженість *Ips typographus* у похідних ялинниках (61,3 %) у 4,6 рази перевищує ураженість у корінних (13,3 %). Кореляція між висотою місцезростання і ІСС є надзвичайно сильною ($r = –0,97$; $P < 0,001$).

Провідним чинником зниження радіального приросту у похідних ялинниках є дефіцит вологи (ГТК < 0,5; внесок 38–45 %), підсилений синергетичним впливом *I. typographus* (15–18 %) і *H. annosum* (10–12 %). У корінних ялинниках переважає структурна міжгалузева конкуренція (46 %), а кліматичний і біотичний чинники мають підпорядковане значення.

Виявлені закономірності є основою для розробки диференційованої лісогосподарської стратегії: невідкладна реконструкція та лісозахист у нижніх поясах (600–1 100 м) і збереження корінних ялинників верхнього поясу як еталонних насаджень і генетичних резерватів.

У розділі представлено результати комплексного дослідження стійкості корінних і похідних ялинників Верховинського надлісництва. Результати систематизовано відповідно до методичних блоків: аналіз кліматичних рядів, порівняльні таксаційні та лісопатологічні дані з пробних площ, дендрохронологічний аналіз, NDVI-динаміка та кореляційний аналіз. Кожен блок завершується статистичним підтвердженням виявлених відмінностей і обговоренням зв’язку результатів із даними зарубіжних досліджень.

РОЗДІЛ 5
ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ ПОЛЬОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1. Нормативно-правова база та ідентифікація небезпечних і шкідливих виробничих чинників під час польових робіт у лісі

Правова основа охорони праці під час проведення польових досліджень визначається законодавством України у сфері охорони праці та спеціальними нормативними документами для лісового господарства. Основним законодавчим актом є Закон України «Про охорону праці» [17] від 14.10.1992 № 2694-XII, чинна редакція якого станом на 2026 р. діє зі змінами. Закон визначає основні засади забезпечення безпечних і здорових умов праці, права та обов’язки роботодавців і працівників [5].

Спеціальні вимоги безпеки під час виконання робіт у лісовому господарстві встановлює НПАОП 02.0-7.01-23 «Мінімальні вимоги [8] щодо безпеки і здоров’я на роботі працівників лісового господарства та під час виконання робіт із зеленими насадженнями», затверджений наказом Міністерства економіки України від 27.11.2023 № 17953. Цей документ є актуальним галузевим нормативом і містить, зокрема, вимоги щодо організації безпечної роботи, підготовки працівників та виконання робіт у лісових насадженнях [23].

Порядок навчання та перевірки знань з питань охорони праці регламентується НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці» [15], затвердженим наказом Держнаглядохоронпраці України від 26.01.2005 № 15. Документ є чинним у редакції від 25.10.2024.

Питання обов’язкових медичних оглядів працівників регулюються наказом МОЗ України від 08.09.2025 № 1393 «Про організацію та проведення обов’язкових медичних оглядів працівників певних категорій» [16]. Він набрав

чинності 18.11.2025 та замінив наказ МОЗ № 246 від 21.05.2007, який втратив чинність.

Для забезпечення працівників засобами індивідуального захисту застосовуються НПАОП 02.0-3.04-18 «Норми безплатної видачі спеціального одягу, спеціального взуття та інших засобів індивідуального захисту для працівників лісового господарства» [9]. Документ включений до чинного Покажчика нормативно-правових актів з охорони праці.

Під час перебування в лісових масивах також необхідно враховувати вимоги «Правил пожежної безпеки в лісах України» [14], затверджених наказом Держкомлісгоспу України від 27.12.2004 № 278, зареєстрованих у Міністерстві юстиції України за № 328/10608. Документ залишається чинним.

Проведення польових досліджень у гірських ялинових деревостанах Верховинського надлісництва пов’язане з впливом широкого спектра небезпечних і шкідливих виробничих чинників (НШВЧ), які за характером впливу поділяють на фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні. Найбільш суттєвими фізичними НШВЧ є ризик падіння на крутих схилах і в природні провалини, особливо під час пересування поза стежками та в умовах густого деревостану; падіння або обламування сухостійних, вітровальних і буреломних дерев та їх частин, що становить підвищену небезпеку в ялинових деревостанах із ослабленими та нестійкими деревами; підвищене фізичне навантаження на опорно-руховий апарат під час тривалого пересування гірським рельєфом із польовим спорядженням; а також вплив несприятливих метеорологічних умов, зокрема переохолодження, перегрівання та різких змін температури й погодних умов [13].

Для забезпечення безпеки польових досліджень необхідно оцінювати рельєф, стан деревостану та погодні умови, визначати небезпечні ділянки, проводити інструктажі й використовувати засоби індивідуального захисту. Особливу увагу варто приділяти безпечному пересуванню на схилах, уникненню сухостійних і повалених дерев, забезпеченню зв’язку та визначенню маршрутів евакуації (табл. 5.1).

Таблиця 5.1

Ідентифікація небезпечних і шкідливих виробничих чинників при проведенні польових досліджень у гірських умовах

Небезпечний / шкідливий чинник	Джерело чинника	Наслідки впливу
Падіння на крутих схилах (нахил 15–40°)	Рельєф гірської місцевості; мокра листяна підстилка і мох; коріння, що стирчить	Травми кінцівок і хребта; переломи; черепно-мозкові травми
Падіння буреломних і всохлих дерев	Ялинники з масовим всиханням і вітровалами; нестійкі сухостійні дерева	Удар важким предметом; переломи; летальний наслідок
Укуси кліщів (*Ixodes ricinus*)	Трав'яно-чагарниковий ярус лісу в теплу пору (квітень–жовтень)	Кліщовий енцефаліт; бореліоз (хвороба Лайма); анаплазмоз
Травми від кернового бурава Haglöf	Неправильне утримання рукоятки; прокручування при затисканні бура в деревині	Порізи, переломи пальців; травми зап’ястя
Гіпотермія і переохолодження	Різка зміна погоди в горах; сильний дощ; тривале перебування у мокрому одязі	Гіпотермія I–III ступеня; втрата свідомості; загроза життю
Тепловий удар і дегідратація	Тривала робота під прямим сонцем у спекотні дні (t > 30°C); брак питної води	Судоми, непритомність; теплові ушкодження органів
Перевантаження опорно-рухового апарату	Перенесення важкого рюкзака (10–15 кг) при тривалих підйомах на 400–600 м	Розтягнення зв'язок; грижа міжхребцевих дисків; перевтома
Відсутність мобільного зв'язку	Рельєф гір (> 1 200 м н.р.м.); відсутність покриття операторів у лісовому масиві	Неможливість виклику допомоги при нещасному випадку
Контакт із хімічними речовинами (мастика для обробки отворів від бурава, лак для кернів)	Нанесення замазки і фіксуючого лаку на зрізи кернів	Подразнення шкіри і слизових оболонок при недотриманні вимог

Розроблено автором за джерелом [30].

Біологічні НШВЧ є важливим чинником ризику під час польових досліджень у лісових насадженнях Верховинського надлісництва. Особливу небезпеку становлять іксодові кліщі, зокрема *Ixodes ricinus* L., які можуть переносити збудників кліщового енцефаліту та Лайм-бореліозу. Ризик контакту з ними підвищується у квітні–жовтні під час перебування в трав’яно-

чагарниковому ярусі та підрості. Для профілактики необхідно використовувати закритий одяг, репеленти та регулярно оглядати шкіру й одяг.

Аналіз даних таблиці 5.1 показує, що під час польових досліджень у гірських ялинниках найбільші ризики пов’язані з особливостями гірського рельєфу, нестійкими деревами, несприятливими погодними умовами та фізичним навантаженням. Окрему небезпеку становлять укуси кліщів, травмування під час роботи з керновим буравом і контакт із хімічними речовинами. Додатковим чинником ризику є обмежений мобільний зв’язок, що може ускладнювати своєчасне надання допомоги в разі нещасного випадку.

5.2. Організаційні та технічні заходи забезпечення безпеки польових робіт у насадженнях з осередками всихання

Підготовка є важливою складовою безпечного проведення польових досліджень. До початку робіт проводять необхідні інструктажі, погоджують маршрут із надлісництвом, визначають відповідальну особу та перевіряють прогноз погоди. Також контролюють справність засобів зв’язку, GPS-навігації, аптечки та іншого спорядження.

Польові роботи проводять групою не менше двох осіб, а в насадженнях із масовим всиханням і вітровалами – бажано трьома. До спорядження групи входять аптечка, запас питної води та харчів, ліхтар, термоковдра, засоби зв’язку, пауербанк і GPS-навігатор або смартфон з офлайн-картами. За погіршення погодних умов чи виникнення небезпечної ситуації роботи припиняють та організовують повернення групи.

Перелік обов’язкового спорядження для польових робіт у гірських умовах наведено у табл. 5.2.

Деревостани з масовим всиханням і значною кількістю сухостою та бурелому становлять підвищену небезпеку під час проведення польових досліджень. Нестійкі дерева можуть падати під впливом вітру або інших зовнішніх чинників, тому перед початком роботи необхідно оцінити стан деревостану та визначити потенційно небезпечні ділянки.

Таблиця 5.2

Засоби індивідуального захисту і вимоги до спорядження для польових робіт

Небезпечний чинник	Засіб індивідуального захисту	Норматив / стандарт
Падіння на крутих схилах	Трекінгові черевики з нековзкою підошвою Vibram і жорстким носком; трекінгові палиці (альпенштоки) для страхування при спуску	ДСТУ EN ISO 20346:2014 (захисне взуття); рекомендовано клас захисту P2 з бічною жорсткістю
Падіння дерев (сухостій, бурелом)	Захисна каска лісогосподарська (клас A); робота на відстані ≥ 2 висоти дерева від нестійких стовбурів; заборона роботи під вітровалом при вітрі > 8 м/с	ДСТУ EN 397:2015; наказ ДАЛР № 164/2011 (Правила безпеки у лісовому господарстві)
Укуси кліщів	Одяг із щільними манжетами і воротом; репеленти ДЕТА-вмісні (> 20 % DEET); самоогляд кожні 2 год; вакцинація проти кліщового енцефаліту (КЕ) за 30 діб до виїзду	Наказ МОЗ України № 521 (профілактика КЕ); ВООЗ рекомендації щодо репелентів
Травми від кернового бурава	Щільні робочі рукавички (шкіряні або щільний текстиль); правильний хват – ребром долоні (не кулаком) для запобігання травмі при зворотньому прокручуванні	Інструкція виробника Haglöf Sweden; НПАОП 0.00-4.01-08 (загальні правила поводження з ручним інструментом)
Гіпотермія	Шаровий принцип одягання (базовий шар – термобілизна; ізолювальний – флісова куртка; захисний – непромокальна мембранна куртка Gore-Tex або аналог); аварійне термоковдро (рятувальна фольга) у кожному рюкзаку; термос із гарячим питтям	ДСТУ ISO 11079:2014 (оцінювання холодового стресу); норми спорядження для гірських маршрутів ДСНС України
Тепловий удар	Головний убір зі щільним козирком; робота в тіні при t > 32°C; мінімум 0,5 л питної води на годину активної роботи; перерва у найспекотніші години (12:00–15:00)	Норми СанПіН 2.2.4.548-96 (адапт.); ДСН 3.3.6.042-99
Перевантаження ОРА	Маса рюкзака ≤ 20 % маси тіла (рекомендовано ≤ 15 кг); важкі предмети – ближче до спини і до центру; ергономічний пояс рюкзака; регулярні зупинки кожні 45–60 хв	Ергономічні норми EN 1005-2; рекомендації Міжнародної організації праці (МОП)

Розроблено автором за джерелами [21, 30].

Під час роботи варто дотримуватися таких вимог: не проводити тривалі роботи безпосередньо під нестійкими деревами, не працювати поодинці, підтримувати постійний зв’язок між членами групи та припиняти роботи за

несприятливих погодних умов, зокрема при сильному вітрі. У разі виявлення дерев із порушеною стійкістю небезпечну ділянку необхідно залишити та позначити для подальшого інформування відповідальних працівників надлісництва [21].

Особливу увагу необхідно приділяти пожежній безпеці, оскільки накопичення сухостою та бурелому підвищує пожежну небезпеку. Під час польових робіт забороняється розпалювати вогнища у невстановлених місцях, залишати непогашені джерела вогню та використовувати обладнання, здатне спричинити займання.

У разі виявлення пожежі необхідно негайно повідомити відповідальних працівників лісового господарства та екстрені служби за номерами 101 або 112, зазначивши місце розташування та характер пожежі. За загрози поширення вогню варто припинити роботи та організовано залишити небезпечну ділянку, рухаючись до відкритої місцевості, дороги або іншого безпечного місця.

Висновки до розділу 5. Під час польових досліджень у гірських ялинниках основними ризиками є падіння на схилах, сухостійні дерева, укуси кліщів, несприятливі погодні умови, фізичне перевантаження та пожежна небезпека. Безпека забезпечується попереднім інструктажем і плануванням маршруту, роботою групою, використанням ЗІЗ, контролем погодних умов, наявністю зв’язку, GPS та аптечки. Важливо також дотримуватися правил роботи в осередках всихання та знати алгоритми першої допомоги.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ

На підставі наведених експериментальних даних можна сформулювати такі *висновки:*

1. Упродовж 1991–2024 рр. у районі дослідження відбулися суттєві зміни кліматичних умов, що характеризуються підвищенням середньорічної температури повітря на 1,4 °С, зменшенням літніх опадів на 38 мм і скороченням тривалості снігового покриву на 28 діб. Частка посушливих декад вегетаційного сезону зросла з 14,8 до 33,1 %. Такі зміни підвищують ризик водного стресу, ослаблення дерев і поширення біотичних агентів у ялинниках, особливо в нижніх висотних поясах.

2. Порівняльна таксаційна оцінка засвідчила істотні відмінності між корінними та похідними ялинниками. Середній запас деревини в корінних насадженнях становив 432 ± 18 м³/га, тоді як у похідних – 323 ± 35 м³/га. Відносна повнота корінних деревостанів дорівнювала 0,83 ± 0,04, а похідних – 0,60 ± 0,07. Отримані результати свідчать про кращі таксаційні характеристики досліджених корінних ялинників порівняно з похідними насадженнями.

3. Встановлено залежність санітарного стану ялинників від висоти місцезростання та відповідності умов зростання екологічним вимогам ялини звичайної. У похідних ялинниках нижнього висотного поясу (600–900 м н.р.м.) індекс санітарного стану становив 3,08 ± 0,28, а частка дерев IV–VI категорій санітарного стану – 43,3 %. У корінних ялинниках верхнього поясу (1300–1550 м н.р.м.) відповідні показники становили 1,62 ± 0,14 та 12,4 %, що свідчить про значно гірший санітарний стан похідних насаджень нижнього висотного поясу.

4. Лісопатологічні обстеження виявили вищий рівень ураження похідних ялинників стовбуровими шкідниками та збудниками кореневих гнилей. За узагальненими даними, частка дерев з ознаками ураження *I. typographus* у похідних ялинниках становила 61,3 ± 8,4 %, а в корінних – 13,3 ± 4,2 %. Ураженість *H. annosum* дорівнювала відповідно 42,0 ± 7,2 та 6,8 ± 2,4 %.

Виявлені відмінності підтверджують необхідність посиленого фітосанітарного контролю похідних ялинників, насамперед у нижніх висотних поясах.

5. Природне поновлення в похідних ялинниках нижнього поясу є недостатнім (420 шт./га) порівняно з корінними насадженнями верхнього поясу (3400 шт./га). У корінних ялинниках також виявлено більше видів ектомікоризних грибів (31–42 проти 14–18), що обґрунтовує необхідність сприяння природному поновленню та збереження біорізноманіття лісових екосистем.

6. Аналіз багаторічної динаміки NDVI за 2001–2024 рр. засвідчив істотне зниження вегетаційного індексу в похідних ялинниках нижнього висотного поясу: з 0,790 до 0,610. У корінних ялинниках верхнього поясу його значення знизилося незначно – з 0,840 до 0,810, причому тренд не був статистично значущим. Просторовий аналіз також показав, що 92 % площ зі зниженням NDVI нижче 0,65 розташовані на висотах до 950 м н. р. м. Отже, дистанційне зондування Землі може бути ефективним інструментом виявлення ділянок із підвищеним ризиком деградації ялинників.

7. Таксаційні, лісопатологічні та дистанційні показники свідчать про вищу поточну стійкість корінних ялинників порівняно з похідними. Водночас їхній стан залежить також від висоти, віку, повноти, видового складу та впливу кліматичних і біотичних чинників. Найуразливішими є похідні ялинники нижніх висотних поясів, де поєднуються ослаблення дерев, поширення шкідників і хвороб та недостатнє природне поновлення.

Згідно з отриманими результатами виділяємо такі *пропозиції виробництву:*

1. Запровадити диференційований підхід до ведення господарства з урахуванням походження, висотного поясу та санітарного стану ялинників. Пріоритет – похідні насадження нижнього поясу (600–900 м н.р.м.), які мають найгірші показники життєздатності.

2. Посилити систематичний лісопатологічний моніторинг похідних ялинників із визначенням індексу санітарного стану, частки всихаючих і

сухостійних дерев, а також рівня ураження *I. typographus* та *H. annosum.* Результати обстежень використовувати для своєчасного виявлення осередків ураження та обґрунтування необхідних лісозахисних заходів.

3. Застосовувати NDVI-моніторинг на основі супутникових знімків Sentinel-2 і Landsat для регулярного оцінювання стану ялинників та виявлення ділянок зі стійким зниженням вегетаційного індексу. Ділянки зі значеннями NDVI нижче 0,65 доцільно включати до переліку першочергового наземного обстеження. Результати дистанційного аналізу необхідно перевіряти польовими дослідженнями.

4. Планувати реконструкцію деградованих похідних ялинників з урахуванням типу лісорослинних умов, висоти місцезростання та природного породного складу потенційних корінних деревостанів. Під час відновлення насаджень на ділянках, де ялина звичайна не відповідає сучасним кліматичним умовам, передбачати формування змішаних деревостанів із деревних видів, екологічно придатних для відповідних лісорослинних умов.

5. Сприяти природному поновленню лісу на ділянках із достатньою кількістю життєздатного підросту. Під час проведення лісогосподарських заходів забезпечувати збереження підросту, підростаючих дерев і компонентів лісового середовища, необхідних для природного відновлення. На ділянках із недостатнім поновленням розглядати можливість доповнення природного відновлення створенням лісових культур відповідно до лісорослинних умов.

6. Зберігати корінні різновікові ялинники як осередки біорізноманіття та стійкості лісових екосистем, ураховуючи їхню структурну неоднорідність, природне поновлення й різноманіття ектомікоризних грибів. Не допускати необґрунтованого спрощення породної та вікової структури цих насаджень.

7. Удосконалити систему раннього виявлення осередків всихання, поєднуючи результати супутникового моніторингу, наземних таксаційних обстежень і лісопатологічного контролю. Такий підхід дасть змогу визначати пріоритетність обстежень, своєчасно реагувати на погіршення стану деревостанів і раціональніше планувати лісозахисні заходи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Адаменко О.М., Гаврилюк Р.А., Зорін Д.А., Яцків В.В. Кліматичні зміни в Карпатах: комплексний аналіз метеорологічних рядів 1961–2020 рр. Івано-Франківськ : Симфонія форте, 2022. 184 с.

2. Звіт для громадськості по моніторингу діяльності Верховинського надлісництва філії «Карпатський лісовий офіс» ДП «Ліси України» за 2025 рік. Верховина, 2026. 22 с.

3. Інститут гірського лісівництва НААНУ. Всихання ялини в Карпатах 2015–2023: причини, масштаби і наслідки. Львів: ІГЛ НААНУ, 2024. 96 с.

4. Криницький Г.Т., Лавний В.В., Мазепа В.Г., Копій Л.І., Дебренюк Ю.М., Лісовий М.М., Лентяков В.В. Лісівництво. Українсько-англійський термінологічний словник. Львів : Компанія «Манускрипт», 2024. 236 с.

5. Лісовий кодекс України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3852-12.

6. Мазепа В.Г. Практичне лісівництво. Електронний посібник. Луцьк : ЛНТУ, 2022. URL: https://elib.lntu.edu.ua.

7. Мазепа В.Г., Новак А.А. Регіональне лісівництво : підручник. Львів: Сполом, 2023. 182 с. URL: https://surl.li/fyhsgg.

8. Мінімальні вимоги щодо безпеки і здоров’я на роботі працівників лісового господарства та під час виконання робіт із зеленими насадженнями : НПАОП 02.0-7.01-23 : затв. наказом Міністерства економіки України від 27.11.2023 № 17953, зареєстр. в Міністерстві юстиції України 13.12.2023 за № 2167/41223. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z2167-23#Text.

9. НПАОП 02.0-3.04-18. Норми безплатної видачі спеціального одягу, спеціального взуття та інших засобів індивідуального захисту для працівників лісового господарства. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0424-09#Text.

10. Основи лісогосподарювання : навчальний посібник. Миклуш С.І. та ін.; за ред. проф. Ю.М. Дебринюка. Львів: ТзОВ «Галицька Видавнича Спілка», 2022. 824 с. URL: https://manusbook.com/9097_Basics_Forestry/index.html.

11. Постанова Кабінету Міністрів України від 16 травня 2007 р. № 733 «Про затвердження Порядку поділу лісів на категорії та виділення особливо захисних лісових ділянок» (із змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 1364 від 28.12.2011 № 748 від 07.08.2013). URL: http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/733- 2007-п/print1395995879936133.

12. Правила поліпшення якісного складу лісів. Постанова Кабінету Міністрів України від 12.05.2007 р. №724. Дата оновлення: URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/724-2007-%D0%BF.

13. Про затвердження Мінімальних вимог щодо безпеки і здоров'я на роботі працівників лісового господарства та під час виконання робіт із зеленими насадженнями: наказ Міністерства економіки України № 17953 від 27.11.2023. URL: https://surli.cc/chdwwc.

14. Про затвердження Правил пожежної безпеки в лісах України : наказ Держкомлісгоспу України від 27.12.2004 № 278. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0328-05#Text.

15. Про затвердження Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці та Переліку робіт з підвищеною небезпекою : наказ Держнаглядохоронпраці України від 26.01.2005 № 15. НПАОП 0.00-4.12-05. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0231-05#Text.

16. Про організацію та проведення обов'язкових медичних оглядів працівників певних категорій : наказ МОЗ України від 08.09.2025 № 1393. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1551-25#Text.

17. Про охорону праці: Закон України. *Відомості Верховної Ради України.* 1992. № 49. Ст. 669. URL: https://surl.li/phombv.

18. Проєкт організації та розвитку ДП «Верховинське лісове господарство». Ірпінь. 2021. 345 с.

19. Проєкт план ведення господарства (План лісоуправління) Верховинського надлісництва філії «Карпатський лісовий офіс» ДП «Ліси України» на 2026 рік. Держлісагенство. Державне спеціалізоване господарське

підприємство «Ліси України». Верховина. 2025. 38 с.

20. Санітарні правила в лісах України. Постанова Кабінету Міністрів України від 27.07.1995 р. № 555. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-95-%D0%BF.

21. Скобло Ю.С., Соколовська Т.Б., Мазоренко Д.І. та ін. Безпека життєдіяльності : навчальний посібник. К., Кондор, 2003. 421 с.

22. Ткач В.П., Романовський В.Ф., Г.Т. Криницький, Шинкаренко І.Б., Парпан В.І., Кобець О.В., Румянцев М.Г., Тарнопільська О.М., Лук'янець В.А., Василевський О.Г., Жежкун А.М. Особливості проведення рубок формування і оздоровлення лісів (методичні рекомендації). Харків : УкрНДІЛГА, 2023. 60 с.

23. Ткачук К.Н., Халімовський М.О., Зацарний В.В. Основи охорони праці : підручник. 2-ге вид., допов. і перероб. К., Основа, 2006. 444 с.

24. Туниця Ю.Ю. Природна економіка і наближене до природи лісівництво: ідентичність концепцій та можливості їхнього взаємозбагачення. *Наукові праці лісівничої академії наук України. Збірник наукових праць.* Львів : РВВ НЛТУ України. 2011. № 9. С. 14–21.

25. Хрик В.М., Кімейчук І.В. Лісівництво : навч. посіб. для здобувачів вищої освіти за спеціальністю 205 «Лісове господарство». Біла Церква, 2021. 444 с.

26. Хрик В.М., Кімейчук І.В. Лісова таксація : навчально-методичний посібник до практичних занять для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності Н4 «Лісове господарство». Біла Церква. «ФОП Середняк Т.К.». 2025. 148 с.

27. Хрик В.М., Мазепа В.Г., Кімейчук І.В., Левандовська С.М., Ситник О.С. Сталий розвиток лісового господарства: навчально-методичний посібник для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 205 «Лісове господарство». Біла Церква : БНАУ, 2024. 217 с.

28. Хрик В.М., Ситник О.С., Левандовська С.М., Кімейчук І.В. Діагностика хвороб та інтегрований захист лісу : навчальний посібник для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності Н4 Лісове

господарство. Біла Церква. 2025. 288 с.

29. Таблиці об’ємів стовбурів деревних порід України / за ред. В.П. Пастернака. Харків: УДНДІЛА, 2021. 156 с.

30. Allen C.D., Breshears D.D., McDowell N.G. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere.* 2015. Vol. 6 (8). DOI: 10.1890/ES15-00203.1.

31. Bebi P., Seidl R., Motta R., Fuhr M., Firm D., Krumm F., Conedera M., Ginzler C., Wohlgemuth T., Kulakowski D. Changes of forest cover and disturbance regimes in the mountain forests of the Alps. *Forest Ecology and Management*. 2017. Vol. 388. P. 43–56. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.10.028.

32. Brundrett M.C., Tedersoo L. Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. *New Phytologist*. 2018. Vol. 220 (4). P. 1108–1115. DOI: 10.1111/nph.14976.

33. Buras A., Menzel A. Projecting Tree Species Composition Changes of European Forests for 2061–2090 under RCP 4.5 and RCP 8.5 Scenarios. *Frontiers in Plant Science.* 2019. Vol. 9. DOI: 10.3389/fpls.2018.01986.

34. Forest Europe. State of Europe's Forests 2023. Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe. Madrid, 2023. 166 p.

35. Garbelotto M., Gonthier P. Biology, Epidemiology, and Control of Heterobasidion Species Worldwide. *Annual Review of Phytopathology.* 2013. Vol. 51. P. 39–59. DOI: 10.1146/annurev-phyto-082712-102225.

36. Hlásny T., König L., Krokene P., Lindner M., Montagné-Huck C., Müller J., Netherer S., Robinet C., Stadelmann G., Temperli C., Wearing C., Seidl R. Bark Beetle Outbreaks in Europe: State of Knowledge and Ways Forward for Management. *Current Forestry Reports.* 2021. Vol. 7 (3). P. 138–165. DOI: 10.1007/s40725-021-00142-x.

37. Holling C.S. Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics.* 1973. Vol. 4. P. 1–23. DOI: 10.1146/annurev.es.04.110173.000245.

38. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working

Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2023. 184 p. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

39. Kirby K.J., Watkins C. Europe's Changing Woods and Forests: From Wildwood to Managed Landscapes. Wallingford: CABI, 2015. 368 p. ISBN: 978-1780644172.

40. Kirby K.J., Quine C., Brown N. The continuing expansion of European forests. *Nature Reviews Earth & Environment.* 2019. Vol. 1. P. 28–41. DOI: 10.1038/s43017-019-0017-0.

41. Korneef J., Hlásny T., Nováková M., Přívětivý T., Grodzki W., Sierota Z. Spatial analysis of bark beetle outbreaks in the Carpathians: predictors and spatiotemporal patterns. *Forest Ecology and Management.* 2022. Vol. 522. Article 120451. DOI: 10.1016/j.foreco.2022.120451.

42. Lange M., Schaber J., Lohmann U., Reichstein M., Mahecha M. Mapping forest disturbances and recovery across Central European landscapes using Landsat time series. *Remote Sensing of Environment.* 2020. Vol. 236. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111503.

43. Lindner M., Maroschek M., Netherer S., Kremer A., Barbati A., Garcia-Gonzalo J., Seidl R., Delzon S., Corona P., Kolström M., Lexer M.J., Marchetti M. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management.* 2010. Vol. 259 (4). P. 698–709.

44. Lloret F., Keeling E.G., Sala A. Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. *Oikos.* 2011. Vol. 120 (12). P. 1909–1920. DOI: 10.1111/j.1600-0706.2011.19372.x.

45. Lygis V., Vasiliauskas R., Stenlid J. Spread of Heterobasidion annosum after pre-commercial and commercial thinning in root and butt rot-infected spruce stands of Lithuania. *Forest Pathology*. 2014. Vol. 34 (5). P. 319–336.

46. Mátyás C., Berki I., Bidló A., Csóka Gy., Czimber K., Führer E., Gálos B., Gribovszki Z., Illés G., Hirka A., Somogyi Z. Sustainability of Forest Cover under Climate Change on the Temperate-continental Xeric Limits. *Forests*. 2018. Vol. 9

(8). DOI: 10.3390/f9080489.

47. McLachlan J.S., Hellmann J.J., Schwartz M.W. A framework for debate of assisted migration in an era of climate change. *Conservation Biology*. 2017. Vol. 21 (2). P. 297–302.

48. Molina A.J., Mencuccini M., Fernández-Cancio A., Cantos J.A., Morales M., Lluís-Gilabert A. Responses of tree water use and growth to drought: individual- and species-level plasticity. *Plant, Cell & Environment.* 2023. Vol. 46 (1). P. 103–117.

49. Palko K., Davide G. (eds.) Climate Change Risks to Forests and Forest Management in the Carpathian Region. UNECE/FAO: Geneva, 2017. 92 p.

50. Savich O.O., Mazepa V.S. Dendroclimatic analysis of Norway spruce (*Picea abies*) along an altitudinal gradient in the Ukrainian Carpathians // *Dendrochronologia.* 2019. Vol. 57. DOI: 10.1016/j.dendro.2019.125615.

51. Schmitt T., Muster C., Schönswetter P. Is geographical range size shaped by niche conservatism in European mountain beetles? *Ecography.* 2019. Vol. 42 (8). P. 1424–1434.

52. Seidl R., Rammer W., Spies T.A. Disturbance legacies increase the resilience of forest ecosystem structure, composition, and functioning. *Ecology*. 2014. Vol. 95 (10). P. 2882–2893. DOI: 10.1890/14-0255.1.

53. Seidl R., Thom D., Kautz M., Martin-Benito D., Peltoniemi M., Vacchiano G., Wild J., Ascoli D., Petr M., Honkaniemi J., Lexer M.J., Trotsiuk V., Mairota P., Svoboda M., Fabrika M., Nagel T.A., Reyer C.P.O. Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change.* 2017. Vol. 7 (6). P. 395–402. DOI: 10.1038/nclimate3303.

54. Senf C., Seidl R., Hostert P. Remote sensing of forest insect disturbances: current state and future directions. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.* 2018. Vol. 60. P. 49–60. DOI: 10.1016/j.jag.2017.04.004.

55. Temperli C., Bugmann H., Elkin C. Adaptive management for competing forest goods and services under climate change. Ecological Applications. 2012. Vol.

22 (8). P. 2065–2077. DOI: 10.1890/12-0210.1.

56. Teuling A.J., Taylor C.M., Meirink J.F., Melsen L.A., Miralles D.G., van Heerwaarden C.C., Vautard R., Stegehuis A.I., Nabuurs G.-J., Vilà-Guerau de Arellano J. Observational evidence for cloud cover enhancement over western European forests. Nature Communications. 2017. Vol. 8. DOI: 10.1038/ncomms14065.

57. Vitali V., Büntgen U., Bauhus J. Silver fir and Douglas fir are more tolerant to extreme droughts than Norway spruce in south-western Germany. *Global Change Biology*. 2017. Vol. 23 (12). P. 5108–5119. DOI: 10.1111/gcb.13868.

58. Zang C., Biondi F. treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*. 2014. Vol. 38 (4). P. 431–436. DOI: 10.1111/ecog.01335.ISO 31000:2018. *Risk management – Guidelines*. 2nd ed. Geneva : International Organization for Standardization, 2018. 16 p.

ДОДАТКИ

Додаток А

Матеріали польових досліджень

Таблиця А1

Основні таксаційні показники пробних площ

№ ТПП	Тип насадження	Висота, м н.р.м.	$D_{сер.}$, см	$H_{сер.}$, м	Запас, м³/га	Повнота	Бонітет	ІСС
1	Похідний	650	28,4	22,1	285	0,54	III	3,1
2	Похідний	690	26,8	21,4	272	0,52	III	2,9
3	Похідний	720	29,1	23,0	298	0,56	III	2,8
4	Похідний	810	30,2	24,5	318	0,60	II–III	2,7
5	Похідний	860	31,4	25,2	335	0,62	II–III	2,6
6	Похідний	920	32,1	26,0	348	0,65	II	2,5
7	Похідний	980	33,6	27,1	362	0,68	II	2,3
8	Похідний	1040	34,8	28,0	375	0,70	I–II	2,2
9	Похідний	1080	35,2	28,8	382	0,72	I–II	2,1
10	Корінний	1120	38,4	29,5	398	0,75	I	1,9
11	Корінний	1160	40,1	30,2	408	0,77	I	1,8
12	Корінний	1200	41,8	31,0	415	0,79	I	1,8
13	Корінний	1250	43,2	31,8	425	0,81	I	1,7
14	Корінний	1290	44,5	32,5	432	0,83	I	1,7
15	Корінний	1330	45,8	33,1	438	0,84	I	1,6
16	Корінний	1370	46,2	33,6	442	0,85	I	1,6
17	Корінний	1410	47,1	34,0	445	0,86	I	1,5
18	Корінний	1450	47,8	34,5	448	0,87	I	1,5
Похідні (n=9), $\bar{x} \pm \sigma$	–	870 ± 142	32,0 ± 2,7	25,8 ± 2,5	342 ± 38	0,62 ± 0,06	II–III	2,6 ± 0,3
Корінні (n=9), $\bar{x} \pm \sigma$	–	1309 ± 112	43,9 ± 3,2	32,0 ± 1,7	428 ± 17	0,82 ± 0,04	I	1,7 ± 0,14
t-тест / Манн–Уітні (P)	–	P < 0,001	P < 0,001	P < 0,001	P < 0,001	P < 0,001	–	P < 0,001

Розроблено автором.

Таблиця А2

Порівняльна лісопатологічна характеристика корінних і похідних ялинників Верховинського надлісництва

Категорія ялинників	К-сть дерев на ТПП, шт.	Категорії санітарного стану дерев, %				ІСС, $\bar{x}$
		1	2–3	4–5	6	
Похідні, 600–900 м	1 248	18,2	38,5	28,4	14,9	3,08
Похідні, 900–1 100 м	1 382	24,8	41,2	22,6	11,4	2,68
Корінні, 1 100–1 300 м	1 190	44,1	38,4	12,8	4,7	1,84
Корінні, 1 300–1 550 м	1 045	52,3	35,2	9,1	3,4	1,62
$НІР_{0,05}$	–	±3,1	±3,8	±2,7	±2,0	±0,18

Розроблено автором.

Таблиця А3

Ураженість ялинників Верховинського надлісництва біотичними агентами за типами насаджень

Тип насаджень	Ураженість *I. typographus*, %	Ураженість *H. annosum*, %	Механічні пошкодж., %	Множинне ураження, %	Індекс біотичного тиску (ІБТ)
Похідні, 600–900 м	68,4	48,2	22,6	38,4	2,42
Похідні, 900–1 100 м	54,1	35,8	18,2	28,7	1,98
Корінні, 1 100–1 300 м	18,3	9,4	12,1	6,8	0,82
Корінні, 1 300–1 550 м	8,2	4,1	9,8	2,4	0,48

*Примітка. ІБТ – індекс біотичного тиску (авторська розробка): ІБТ = Σ (частка дерев з ураженням × ваговий коефіцієнт агента).

Розроблено автором.

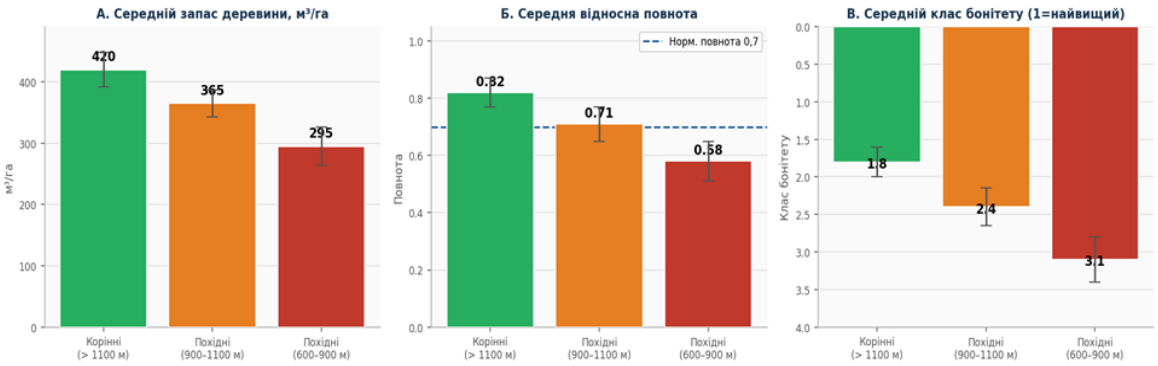

Рис. А1. **Порівняльні таксаційні показники корінних і похідних ялинників Верховинського надлісництва**

Розроблено автором із використанням Claude як інструменту візуалізації.