

ISSN 2664-4452
2020 | 11 (3)



Ukrainian Journal of Forest and Wood Science

UKRAINIAN JOURNAL OF FOREST AND WOOD SCIENCE

Науковий журнал. Vol. 11, No 3, 2020

ISSN 2664-4452 (Print)

ISSN 2664-4460 (Online)

*Науковий журнал входить до категорії «Б» (сільськогосподарські та технічні науки)
Переліку наукових фахових видань України (наказ МОН України № 1643 від 28.12.2019 р.)*

Засновник:

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Редакційна колегія:

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР П. І. Лакида , д. с.-г. н., проф., чл.-кор. НААН України	EDITOR-IN-CHIEF Petro Lakyda , Dr. Sci., Prof.
ЗАСТУПНИКИ ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА А. М. Білоус , д. с.-г. н., с. н. с. В. В. Мирюнюк , к. с.-г. н., доц.	DEPUTY CHIEF EDITORS Andrii Bilous , Dr. Sci., Prof. Viktor Myroniuk , Ph. D., Assoc. Prof.
ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР В. І. Мельник , к. с.-г. н.	EXECUTIVE SECRETARY Viktoriia Melnyk , Ph. D.
ЗАСТУПНИК ВІДПОВІДАЛЬНОГО СЕКРЕТАРЯ В. І. Блищик , к. с.-г. н.	DEPUTY EXECUTIVE SECRETARY Volodymyr Blyshchuk , Ph. D.
ЧЛЕНИ КОЛЕГІЇ <i>205 – Лісове господарство</i> Р. Д. Василюшин , д. с.-г. н., доц. С. В. Зібцев , д. с.-г. н., проф. Флоріан Краксер , Ph. D. (Австрія) С. Б. Ковалевський , д. с.-г. н., проф. І. П. Лакида , к. с.-г. н., доц. А. З. Швиденко , д. с.-г. н., проф. (Австрія) <i>206 – Садово-паркове господарство</i> О. В. Колесніченко , д. б. н., доц. Н. О. Олексійченко , д. с.-г. н., проф. С. Ю. Попович , д. б. н., проф. М. І. Сорока , д. б. н., проф. <i>187 – Деревообробні та меблеві технології</i> П. А. Бехта , д. техн. н., проф. А. М. Єрошенко , к. техн. н., доц. О. О. Пінчевська , д. техн. н., проф. Олександр Саленікович , Ph. D. (Канада) Ю. В. Цапко , д. техн. н., с. н. с. М. Г. Чаусов , д. техн. н., проф.	EDITORIAL BOARD MEMBERS <i>Forestry</i> Roman Vasylyshyn , Dr. Sci., Assoc. Prof. Sergiy Zibtsev , Dr. Sci., Prof. Florian Kraxner , Ph. D. Sergii Kovalevskiy , Dr. Sci., Prof. Ivan Lakyda , Ph. D., Assoc. Prof. Anatoly Shvidenko , Dr. Sci., Prof. <i>Landscape-Park Management</i> Olena Kolesnichenko , Dr. Sci., Assoc. Prof. Nadiia Oleksiichenko , Dr. Sci., Prof. Sergii Popovych , Dr. Sci., Prof. Myroslava Soroka , Dr. Sci., Prof. <i>Wood Processing and Furniture Technologies</i> Pavlo Bekhta , Dr. Sci., Prof. Andriy Yeroshenko , Ph. D., Assoc. Prof. Olena Pinchevska , Dr. Sci., Prof. Alexander Salenikovich , Ph. D. Yuriy Tsapko , Dr. Sci., Prof. Mykola Chausov , Dr. Sci., Prof.

Адреса редакції:

03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15. Тел./факс: +380 44 527 87 20
e-mail: ukrforest@nubip.edu.ua

Рекомендовано до друку

*Вченою радою Національного університету біоресурсів і природокористування України
Протокол № 2 від 23.09.2020 р.*

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ №23989-13829ПП від 19.06.2019 р.

Науковий редактор – Пазюк О. Г.

Дизайн обкладинки – Ковалевська Ю. Ю., Шевчук М. О.

Підписано до друку 20.10.2020 р. Формат 70x100/16. Друк офсетний.
Папір офсетний. Ум. друк. арк. 8.6. Зам. № 1025.

Віддруковано у ТОВ «КОМПРИНТ»

03150, м. Київ, вул. Предславинська, 28, тел.: 067-209-54-30

ЗМІСТ

ЛІСОВЕ ГОСПОДАРСТВО

Бала О. П.

ДО МЕТОДИКИ АКТУАЛІЗАЦІЇ ОСНОВНИХ ТАКСАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ
ДЕРЕВОСТАНІВ ТВЕРДОЛИСТЯНИХ ДЕРЕВНИХ ВИДІВ УКРАЇНИ 4

Дячук П. П.

ВИЗНАЧЕННЯ ВИСОТИ ДЕРЕВ ЗА ДАНИМИ РАСТРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ
РІЗНОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ 15

Максiмцев С. І., Дударець С. М.

ШУМОПОГЛИНАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРИДОРОЖНІХ ЛІСОВИХ СМУГ
РІЗНИХ КОНСТРУКЦІЙ В УМОВАХ ЗАХІДНОГО ПОЛІССЯ 25

Пінчук А. П., Ліханов А. Ф., Іванюк І. В., Співак М. Я.

ВПЛИВ НАНОЧАСТИНОК SeO_2 НА ПРОРОСТАННЯ НАСІННЯ
ТА СИНТЕЗ ФЕНОЛІВ У ПРОРОСТКАХ ЯЛИНИ ЄВРОПЕЙСЬКОЇ..... 36

Пузріна Н. В., Явний М. І.

ВПЛИВ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ НА ОСЛАБЛЕННЯ
В'ЯЗОВИХ ДЕРЕВОСТАНІВ ЗА УМОВ РОЗВИТКУ КОМАХ-КСИЛОФАГІВ 45

Решетюк О. В., Філіпенко А. Б.

РИЗИКИ РОЗВИТКУ ІРЖАСТИХ ГРИБІВ (*Puccinia graminis* Pers.)
НА КУЛЬТИВОВАНИХ БАРБАРИСАХ (РІД *Berberis* L.) 55

САДОВО-ПАРКОВЕ ГОСПОДАРСТВО

Дзиба А. А., Рибчинська Н. П., Рибчинський А. А.

ІСТОРІЯ, ТАКСОНОМІЧНИЙ СКЛАД, БІОМОРФОЛОГІЧНА
ТА ЕКОЛОГІЧНА СТРУКТУРИ ДЕНДРОФЛОРИ АРБОРЕТУМУ
ШАЦЬКОГО ЛІСОВОГО КОЛЕДЖУ ім. В. В. СУЛЬКА 62

ДЕРЕВООБРОБНІ ТА МЕБЛЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ

Ломага В. В., Цапко О. Ю., Цапко Ю. В., Бондаренко О. П.

ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ЗАПАЛЮВАННЯ ДЕРЕВНОЇ СИРОВИНИ
ПРИ ДІЇ ВИСОКОЇ ТЕМПЕРАТУРИ РАДІАЦІЙНОЇ ПАНЕЛІ 77

СТОРІНКИ ПАМ'ЯТІ

Маурер В. М., Дударець С. М.

ІВАН МИКОЛАЙОВИЧ САЗОНОВ – ДОЦЕНТ ПО АТЕСТАТУ,
ДОКТОР НАУК І ПРОФЕСОР ПО СУТТІ 85

CONTENTS

FORESTRY

Bala O. P.

TO THE METHODS FOR ACTUALIZATION OF MAIN STANDS
PARAMETERS OF HARDWOOD TREE SPECIES OF UKRAINE 4

Diachuk P. P.

DETERMINATION OF TREE HEIGHT ACCORDING TO DATA
OF RASTER IMAGES DIFFERENT RESOLUTION 15

Maksimtsev S. I., Dudarets S. M.

NOISE-ABSORBING PROPERTIES OF ROAD-WOOD FOREST STRIPS OF
DIFFERENT STRUCTURES IN THE CONDITIONS OF WESTERN POLISYA 25

Pinchuk A. P., Likhanov A. F., Ivanyuk I. V., Spivak M. Ya.

INFLUENCE OF CeO₂ NANOPARTICLES ON SEED GERMINATION
AND SYNTHESIS OF PHENOLS IN SPRUCE SEEDLINGS 36

Puzrina N. V., Yavniy M. I.

INFLUENCE OF METEOROLOGICAL FACTORS ON WEAKENING OF ELM TREES
UNDER CONDITIONS OF DEVELOPMENT OF INSECT-XYLOPHAGES 45

Reshetiuk O. V., Filipenko A. B.

THE GROWTH OF RUSTY MUSHROOMS (*Puccinia graminis* Pers.)
ON BARBERRIES (GENUS *Berberis* L.) 55

LANDSCAPE-PARK MANAGEMENT

Dzyba A. A., Rybchynska N. P., Rybchynskyi A. A.

HISTORY OF FORMATION, TAXONOMIC COMPOSITION, BIOMORPHOLOGICAL
AND ECOLOGICAL STRUCTURE OF THE ARBORETUM OF SHATSK
FOREST COLLEGE NAMED AFTER V. V. SULKA 62

WOOD PROCESSING AND FURNITURE TECHNOLOGIES

Lomaha V. V., Tsapko O. Yu., Tsapko Yu. V., Bondarenko O. P.

DETERMINATION OF THE TIME OF IGNITION OF PLANT RAW
UNDER THE HIGH TEMPERATURE OF THE RADIATION PANEL 77

MEMORY PAGES

Maurer V. M., Dudarets S. M.

IVAN MYKOLAIOVYCH SAZONOV – ASSOCIATE PROFESSOR BY CERTIFICATE,
DOCTOR OF SCIENCE AND PROFESSOR IN ESSENCE 85

ДО МЕТОДИКИ АКТУАЛІЗАЦІЇ ОСНОВНИХ ТАКСАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ДЕРЕВОСТАНІВ ТВЕРДОЛИСТЯНИХ ДЕРЕВНИХ ВИДІВ УКРАЇНИ

О. П. БАЛА, кандидат сільськогосподарських наук, доцент
<https://orcid.org/0000-0001-6538-8876>, e-mail: bala@nubip.edu.ua
Національний університет біоресурсів і природокористування України

Безперервне лісовпорядкування, як один із методів впорядкування лісового фонду країни, на відміну від базового, має низку переваг, які передусім надають можливість отримати найбільш повну та достовірну інформацію про сучасний стан лісового фонду, оскільки передбачає щорічне оновлення таксаційних даних про лісовий фонд України. Твердолистяні деревні види (дуб, ясен, бук, граб та інші) посідають особливе місце серед усіх, що зростають на території України, та займають майже 44 % площ лісових ділянок, вкритих лісовою рослинністю. За даними останнього державного обліку лісів станом на 1 січня 2011 р. серед твердолистяних деревних видів переважають насадження дуба звичайного – 62,6 % площі всіх твердолистяних деревних видів, бук лісовий – 20,2 %, граб звичайний – 3,2 % та ясен звичайний, що формує переважно мішані насадження з дубом. Системний підхід до ефективного вирішення проблеми ведення безперервного лісовпорядкування потребує розроблення об'єктивних методів і математичних моделей актуалізації основних таксаційних ознак лісостанів. В Україні для проведення актуалізації таксаційних параметрів деревостанів розроблено дві методики щодо прогнозу їх росту. Перша базується на моделюванні відсотка поточного приросту деревостану за середньою висотою та запасом, друга – на розроблених динамічних бонітетних шкалах і таблицях ходу росту для модальних насаджень. Метою роботи є вдосконалення методичних підходів до моделювання прогнозу росту основних таксаційних показників деревостанів за другою методикою. У результаті проведених досліджень було запропоновано для моделювання прогнозу росту за всіма таксаційними ознаками використовувати нове уніфіковане співвідношення таксаційного показника рік уперед до цього ж показника зараз, помноженого на вік деревостану. Це дало можливість під час моделювання описати зміни в рості за основними таксаційними показниками з майже абсолютною точністю (коефіцієнт детермінації отриманих моделей становить 1,0). Отримане для прогнозування росту рівняння має однаковий вид для деревостанів усіх деревних видів, різного походження, складу та класів бонітету.

Ключові слова: прогноз росту, математичні моделі, модальні деревостани, походження деревостанів, нелінійна регресія.

Актуальність. Забезпечення поступового переходу до ведення господарювання на засадах сталого управління, безперервного, раціонального, невиснажливого

лісокористування та покращення якісного складу лісів є одним із основних завдань сучасного лісового господарства України. Виконання поставлених завдань потребує

не лише застосування комплексу заходів із розширеного відтворення лісових ресурсів, догляду за ними та охорони, а й удосконалення їх обліку, таксаційної оцінки та прогнозу росту для подальшого якісного планування та управління лісовим господарством країни.

Для вирішення зазначених завдань особливе значення має проблема теоретичного та методичного обґрунтування для практичної реалізації системи моделювання оцінки та прогнозу росту деревостанів, що дає змогу отримувати необхідні математичні моделі й таксаційні нормативи у вигляді бонітетних шкал, таблиць ходу росту та продуктивності лісостанів, а також моделей прогнозування зміни таксаційних показників у процесі їх росту.

Створення електронної бази даних «Лісовий фонд України», зокрема автоматизованої інформаційно-картографічної системи «Управління лісовими ресурсами» (УЛР), зумовило необхідність застосування методів обліку лісів, що орієнтовані на особливості автоматизованого оброблення даних.

Особливе місце серед деревних видів, що зростають на території України, посідають твердолистяні (дуб, ясен, бук, граб та інші), які займають майже 44 % від загальної площі лісових ділянок, вкритих лісовою рослинністю, та мають важливе екологічне та господарське значення. За даними останнього державного обліку лісів станом на 1 січня 2011 р. серед твердолистяних деревних видів переважають насадження дуба звичайного – 62,6 % площі всіх твердолистяних деревних видів (з них 51,1 % насінневого та 11,5 % – вегетативного походження), бук лісовий – 20,2 %, граб звичайний – 3,2 % (Handbook of the forest fund of Ukraine, 2012). Чисті за складом ясеневі насадження трапляються дуже рідко (4,6 % загальної площі насаджень з участю ясеня), цей вид є супутнім і зростає переважно з дубом (45,4 % площ) або

створює мішані насадження, де він є головною породою на 39,3 % загальної площі насаджень з участю ясеня (Bala, 2016).

Безперервне лісовпорядкування, як один із методів упорядкування лісового фонду країни, на відміну від базового, має низку переваг, які передусім дають можливість отримати найбільш повну та достовірну інформацію про сучасний стан лісового фонду, оскільки передбачає щорічне оновлення таксаційних даних про лісовий фонд України (Hirs, Novak, & Kashpor, 2004). Поглиблене вивчення закономірностей росту модальних лісостанів має особливе значення під час проведення безперервного лісовпорядкування, оскільки воно враховує не лише сучасний стан насаджень, а і їх зміну в динаміці. Система безперервного лісовпорядкування містить підсистему актуалізації (оновлення) даних лісового фонду, яка потребує розробки нових нормативів для прогнозу росту насаджень.

Однією із важливих складових оцінки сучасного стану насаджень та прогнозу їх росту є створення нормативів продуктивності лісостанів, головними із них є таблиці ходу росту для модальних деревостанів. Дані таблиці дають змогу відобразити особливості динаміки та процесів росту у характерних лісостанах, а також оцінити результати ведення господарства, аналізуючи їх стан. Таблиці ходу росту для модальних деревостанів слугують вихідним матеріалом для розроблення математичних моделей прогнозу росту лісостанів за основними таксаційними показниками.

Системний підхід до ефективного вирішення поставленої проблеми потребує розроблення об'єктивних методів та математичних моделей актуалізації основних таксаційних ознак лісостанів. Наукова обґрунтованість таких моделей значною мірою визначає точність прогностичних оцінок стану лісових наса-

джен, зміст та обсяги проектних господарських заходів, зокрема рубок, пов'язаних із веденням лісового господарства та рубок головного користування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Система актуалізації лісового фонду входить до складу автоматизованої інформаційно-картографічної системи УЛР і є основною у проведенні всіх розрахунків, що стосуються обслуговування та використання реляційної бази даних «Повидільна таксаційна характеристика лісу» (РБД ПТХЛ). Поєднання РБД ПТХЛ із комплексом програмних і технічних засобів у сукупності забезпечують створення та експлуатацію інформаційних систем накопичення інформації, що надходять від декількох джерел, її оновлення, коригування та багатоцільове використання (Catalog of application software, 2000). Основою РБД ПТХЛ є матеріали лісоінвентаризації минулих років. Щорічне оновлення бази даних проводиться з двох джерел:

- поточні зміни у лісовому фонді, які визначають шляхом проведення натурної таксації безпосередньо у кожному підприємстві у таких лісових ділянках: прийняті до складу лісового фонду; ділянки, у яких змінилась категорія земель; насадження, що постраждали унаслідок стихійного лиха, пожеж, масового розмноження хвороб і шкідників; виділи, де у поточному році були проведені лісогосподарські заходи (Shvets, 1997);
- у насадженнях, де не відбулося ніяких змін, крім природних процесів росту, проводять актуалізацію таксаційних параметрів із використанням розроблених математичних моделей прогнозу росту.

Крім застосування для актуалізації стану лісового фонду, математичні моделі прогнозу росту відкривають цілу низку програмних продуктів для оптимізації ведення лісового господарства за умови використання елементів імітаційного мо-

делювання. Прикладом таких комплексів є різні інформаційні системи, зокрема системи підтримки прийняття управлінських рішень. Основне використання цих програмних комплексів – розроблення та аналіз різних варіантів систем ведення лісового господарства. У світі широке застосування отримали системи для довгострокового аналізу, в основі яких, зазвичай, лежать такі елементи:

- моделі росту і розвитку окремого дерева;
- моделі впливу навколишнього середовища;
- модель диференціації окремих дерев у насадженні.

Поєднання цих компонентів дає можливість розробити моделі росту і розвитку насадження з урахуванням впливу навколишнього середовища та конкурентної боротьби в насадженні між окремими деревами. Такі системи характеризуються досить високою точністю прогнозу, але мають складний математичний апарат і потребують спеціального програмного забезпечення. Відповідно, вартість таких програмних продуктів є значною, тож їх використовують для створення планів ведення господарства на значних територіях або з науковою метою.

Інші системи підтримки прийняття рішень складаються з окремих елементів – моделей прогнозу росту насадження, рубок догляду, рубок головного користування, виходу деревини від різних видів користування. На відміну від попередніх, вартість створення таких систем є незначною, основна галузь їх використання – розроблення планів менеджменту лісових ресурсів для незначних за площею підприємств.

В Україні для проведення актуалізації таксаційних параметрів деревостанів розроблено дві методики щодо прогнозу їх росту. Перша базується на моделюванні відсотка поточного приросту деревостану за середньою висотою та запасом

(Strochinskiy, 1992), а також загальновідомих формулах лісової таксації та використанні деяких табличних даних як нормативних. Другу методику прогнозу росту насаджень уперше було запропоновано та описано в роботі (Lakyda, & Bala, 2012), вона базується на розроблених динамічних бонітетних шкалах і таблицях ходу росту для модальних насаджень. У цьому методі для математичного моделювання використовують основні таксаційні показники, такі як: середня висота, середній діаметр, сума площ поперечних перерізів або видове число і запас на 1 га. За основу моделювання прогнозу росту за всіма таксаційними показниками взято співвідношення значення таксаційного показника рік уперед до того самого показника зараз. Продовження досліджень прогнозу росту деревостанів за цією методикою також проводили інші науковці (Lakyda, Terentiev, & Vasylyshyn, 2012; Lakyda, & Aleksiiuk, 2017; Lakyda, & Atamanchuk, 2014; Lakyda, & Volodymyrenko, 2008; Lakyda, Oborska, Blyshchuk, & Smolin, 2020).

Прогноз росту основних таксаційних показників для модальних деревостанів у наших дослідженнях базується на розробленій динамічній бонітетній шкалі та таблицях ходу росту для модальних деревостанів. Математичному обробленню та моделюванню підлягають основні таксаційні параметри, як-от середня висота, середній діаметр, сума площ поперечних перерізів та запас на 1 га. Інші параметри деревостану є похідними показниками і можуть бути визначені шляхом нескладних математичних розрахунків, зокрема це стосується і прогнозу частини деревостану, що вибирається.

Мета дослідження – удосконалення методичних підходів до моделювання прогнозу росту основних таксаційних показників деревостанів для проведення актуалізації баз даних лісової інформації.

Матеріали і методи дослідження. Для проведення досліджень використо-

ували дані розроблених таблиць ходу росту для модальних деревостанів твердолистяних деревних видів (Bala, 2019). Статистичне оброблення та моделювання математичних залежностей проводили з використанням методів регресійного аналізу, а саме функції нелінійної регресії статистичного пакета прикладних програм IBM SPSS Statistics. В основу цієї функції покладено знаходження коефіцієнтів рівняння за незалежних змінних із використанням методу найменших квадратів. Для аналізу отриманих результатів та їх порівняння застосовували графічний метод.

Результати дослідження та їх обговорення. Використання методу прогнозу росту та актуалізації таксаційних показників, розробленого під керівництвом проф. А. А. Строчинського (Strochinskiy, 1992), передбачає використання значної кількості нормативних значень та співвідношень між певними таксаційними показниками, що ускладнює проведення розрахунків. Другий метод дещо спрощує розрахунки, використовуючи одне уніфіковане співвідношення значення таксаційного показника рік уперед до того самого показника зараз. Загальний вигляд цього відношення такий:

$$T_{A+1}/T_A,$$

де T – значення таксаційного показника,

A – вік деревостану. Це співвідношення може базуватися на даних будь-яких нормативів, таблиць і шкал. Для прогнозування росту наявних насаджень використано розроблені таблиці ходу росту для модальних деревостанів, що враховують біологічні особливості росту кожного деревного виду. Ця методика унеможливує використання нормативних і базових значень таксаційних показників, які відповідають даним із таблиць ходу росту для нормальних чи оптимальних деревостанів. Зокрема для основних середніх таксаційних показників брали

моделі та розрахунки, що покладені в основу розроблених таблиць ходу росту для модальних штучних чистих дубових деревостанів. Потім, використовуючи розраховані показники з інтервалом в 1 рік, починаючи з віку 10 років, знайшли співвідношення T_{A+1}/T_A , тобто відношення значень таксаційних показників у віці 11 і 10 років, 12 і 11, 13 і 12 і так далі до віку 120 років. Графічну інтерпретацію отриманих співвідношень для основних таксаційних показників, що входять до таблиць ходу росту для модальних деревостанів, наведено на рис. 1. Показано, що вони перебувають у певній залежності щодо віку деревостану. Кожне співвідношення має свої особливості, які переважно проявляються в молодому віці.

З даних рис. 1 можемо простежити, що переважна більшість досліджуваних залежностей має характер гіперболи, тобто зі збільшенням віку поступово спадає та наближується до одиниці, за винятком кількості дерев на 1 га та показника видового числа. На відміну від

усіх інших таксаційних показників, два останні, в натуральних величинах, зі збільшенням віку поступово зменшуються, тоді як інші, навпаки, збільшуються. Отримані залежності загалом математично описати нескладно, проте для прогнозування росту, з урахуванням розрахунку співвідношення показників через один рік, важливим є найбільш точніше описати вхідні дані. Подібні залежності моделювали в попередніх дослідженнях для різних деревних видів із досить високим коефіцієнтом детермінації (понад 0,995) (Lakyda, & Bala, 2012; Lakyda, Terentiev, & Vasylyshyn, 2012; Lakyda, & Aleksiiuk, 2017; Lakyda, & Atamanchuk, 2014; Lakyda, & Volodymyrenko, 2008, Lakyda et al., 2020).

Однак, якщо досліджуване співвідношення перемножити на вік (отримавши $\frac{T_{A+1}}{T_A} \cdot A$) та відобразити його в динаміці, отримаємо такі залежності (рис. 2).

З даних рис. 2 можна побачити, що всі попередні залежності, що мали різний характер, набули залежності, дуже

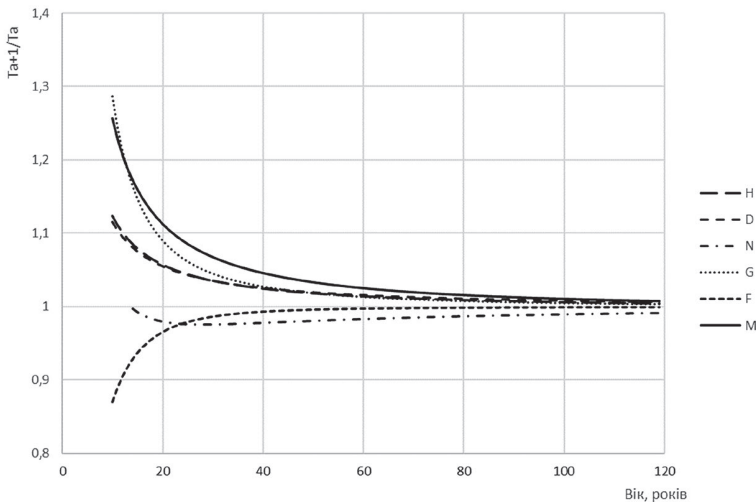


Рис. 1. Динаміка відношення таксаційного показника 1 рік уперед до цього самого показника на теперішній час (*H* – середня висота, *D* – середній діаметр, *N* – кількість дерев на 1 га, *G* – сума площ перерізів на 1 га, *F* – видове число, *M* – запас на 1 га)

подібної до прямої з незначними вигинами та відмінностями у молодому віці.

Спочатку для математичного опису отриманих залежностей було використано рівняння прямої, що має такий вигляд:

$$\frac{T_{A+1}}{T_A} \cdot A = a_0 + a_1 \cdot A. \quad (1)$$

Результати моделювання, отримані вибірково для різних деревних видів у розрізі досліджуваних груп різних за походженням та класами бонітету, показали, що коефіцієнт детермінації варіює у межах 0,989 – 0,998, що загалом є прийнятним, але не задовольняє наші вимоги щодо максимального наближення цього показника до значення 1,000. Для більшої гнучкості математичної моделі опису отриманих залежностей було вирішено використати рівняння такого типу:

$$\frac{T_{A+1}}{T_A} \cdot A = a_0 + a_1 \cdot A + \frac{a_2}{A} + a_3 \cdot A^2 + \frac{a_4}{A^2}. \quad (2)$$

Результати моделювання засвідчили, що за всіма таксаційними показниками в розрізі груп за походженням та класами бонітету, коефіцієнт детермінації

склав 1,000, що повністю задовольняє вимоги до поставлених моделей прогнозу росту.

Отримана математична модель, як і попередні, що базуються на цьому принципі прогнозу росту, має властивість інваріантності за віком. Після остаточних перетворень, змінивши показник віку A на $A+1$, отримуємо таку загальну універсальну формулу для моделювання всіх досліджуваних таксаційних показників, а саме середньої висоти, середнього діаметра, суми площ поперечних перерізів на 1 га і запасу на 1 га для всіх досліджуваних твердолистяних деревних видів:

$$T_{A+i} = T_A \cdot \prod_{i=1}^n \frac{a_0 + a_1 \cdot (A+i) + \frac{a_2}{(A+i)} + a_3 \cdot (A+i)^2 + \frac{a_4}{(A+i)^2}}{A+i}. \quad (3)$$

Використовуючи функцію нелінійної регресії статистичного пакета прикладних програм IBM SPSS Statistics, виконали пошук коефіцієнтів отриманої моделі (3) в розрізі деревних видів, груп досліджуваних деревостанів за походженням та складом, а також найбільш поширеними класами бонітету.

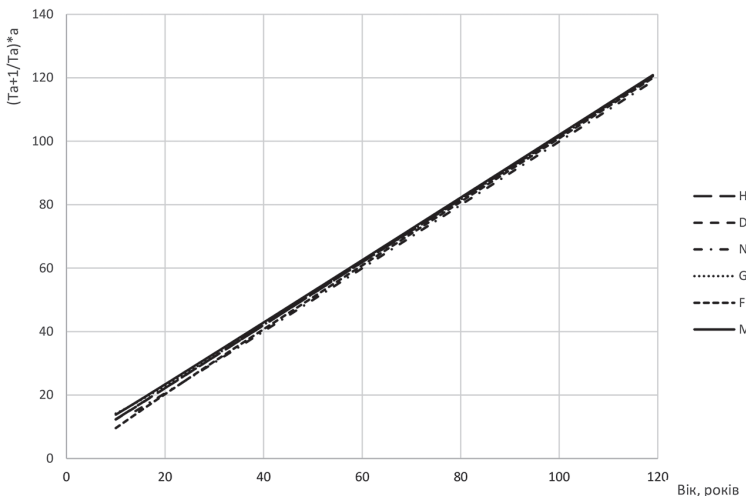


Рис. 2. Динаміка відношення таксаційного показника 1 рік уперед до цього самого показника на теперішній час, помноженого на вік деревостану (H – середня висота, D – середній діаметр, N – кількість дерев на 1 га, G – сума площ перерізів на 1 га, F – видове число, M – запас на 1 га)

Фрагменти результатів проведених розрахунків для запасу на 1 га мішаних букових деревостанів природного походження I класу бонітету за допомогою програми IBM SPSS Statistics наведено на рис. 3.

Із наведених таблиць результатів розрахунку коефіцієнтів регресії можемо побачити, що верхня та нижня межі довірчого інтервалу варіації коефіцієнтів рівняння мають однаковий знак. Це свідчить про значущість усіх отриманих коефіцієнтів, оскільки в межі довірчого інтервалу не потрапляє значення нуля, яке б унеможливило використання коефіцієнта в загальному рівнянні. Отримані коефіцієнти мають високий показник кореляції між собою, що засвідчує однорідність досліджуваної залежності. Сума квадратів залишків у дисперсійному аналізі дуже наближена до нуля, що в результаті розрахунку коефіцієнта детермінації (R^2) становить 1,000. Для всіх інших таксаційних показників і деревних видів результати отримано аналогічні.

Отримані коефіцієнти рівняння (3) для прогнозу запасу на 1 га для букових деревостанів природного походження в розрізі класів бонітету наведено в табл. 1.

Як свідчать дані табл. 1, аналіз величин отриманих коефіцієнтів показав, що

зі збільшенням класу бонітету немає чіткої тенденції у зміні їхніх значень, що простежується для всіх досліджуваних таксаційних показників і деревних видів. Це відхиляє необхідність вирівнювати коефіцієнти моделі залежно від класу бонітету, крім того, в цьому випадку зменшується точність розрахунків. Також для деяких деревних видів коефіцієнт a_3 набуває нульового значення, що виключає його із загальної формули розрахунків. Це іноді відбувається для деяких класів бонітету у вегетативних мішаних дубових деревостанів та вегетативних чистих грабових при прогнозуванні запасу на 1 га у найнижчих класах бонітету.

Враховуючи значну кількість отриманих нормативів, наведемо порівняння розроблених математичних моделей прогнозу росту та розрахунки лише для середньої висоти дубових мішаних деревостанів штучного походження та чистих букових деревостанів, для яких було розроблено таблиці ходу росту для модальних насаджень (Bala, 2019).

Порівняльну оцінку розроблених нормативів прогнозу росту проводили у декілька етапів на різних вікових проміжках для I класу бонітету за такою методикою. Було виділено 6 груп із різ-

1. Коефіцієнти рівняння (3) для прогнозу росту букових деревостанів за запасом на 1 га (M)

Група за походженням та складом	Клас бонітету	Коефіцієнти рівняння (3)				
		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
Насінневі природні мішані насадження	IV	2,044	0,974	14,765	9,188E-05	-50,370
	III	1,909	0,976	14,553	8,579E-05	-52,168
	II	1,859	0,975	16,698	8,949E-05	-63,131
	I	1,763	0,977	15,900	8,306E-05	-61,300
	I ^a	1,705	0,978	15,957	8,039E-05	-62,745
	I ^b	1,666	0,978	15,874	7,799E-05	-63,345
Насінневі природні чисті насадження	IV	1,639	0,982	7,284	5,851E-05	-22,348
	III	1,759	0,978	10,635	7,447E-05	-36,670
	II	1,732	0,977	12,747	8,029E-05	-47,152
	I	1,634	0,979	11,359	7,181E-05	-42,284
	I ^a	1,609	0,980	11,781	7,165E-05	-44,825
	I ^b	1,609	0,979	12,441	7,290E-05	-48,219

Аналіз нелінійної регресії

Хронологія ітерацій

Номер ітерації	Сума квадратів залишків	Параметр				
		a0	a1	a2	a3	a4
1.0	582663,274	,000	,000	,000	,000	,000
1.1	,002	1,806	,976	14,940	8,661E-5	-54,680
2.0	,002	1,806	,976	14,940	8,661E-5	-54,680
2.1	,002	1,763	,977	15,900	8,306E-5	-61,300
3.0	,002	1,763	,977	15,900	8,306E-5	-61,300
3.1	,002	1,763	,977	15,900	8,306E-5	-61,300

Оцінки параметрів

Параметр	Оцінка	Стандартна помилка	95% довірчий інтервал	
			нижня межа	верхня межа
a0	1,763	,021	1,720	1,805
a1	,977	,000	,976	,977
a2	15,900	,511	14,888	16,913
a3	8,306E-5	,000	7,984E-5	8,629E-5
a4	-61,300	3,744	-68,724	-53,876

Кореляції оцінок параметрів

	a0	a1	a2	a3	a4
a0	1,000	-,987	-,984	,957	,946
a1	-,987	1,000	,946	-,991	-,893
a2	-,984	,946	1,000	-,901	-,987
a3	,957	-,991	-,901	1,000	,838
a4	,946	-,893	-,987	,838	1,000

Аналіз дисперсії

Джерело	Сума квадратів	Ступені свободи	Середні квадрати
Регресія	593338,711	5	118667,742
Залишок	,002	105	,000
Нескорегований результат	593338,714	110	
Скорегований результат	107035,244	109	

a. R-квадрат = 1 - (Залишкова сума квадратів) / (Скорегована сума квадратів) = 1,000.

Рис. 3. Фрагмент розрахунку результатів моделювання статистичним пакетом IBM SPSS Statistics за методом нелінійної регресії

ним періодом прогнозування. З метою запобігання накопичення похибки під час розрахунків початкову висоту на кожен віковий проміжок брали з порівнюваних таблиць.

Для довготермінового періоду прогнозування використано 2 групи на таких вікових проміжках: 1 група – вік від 10 до 120 років, 2 група – з проміжками 10–60 років і 60–120 років. У середньотерміновому періоді прогнозування та-

кож виділено 2 групи для насаджень від 10 до 120 років та періодом прогнозу через 30 і 15 років відповідно. Для короткотермінового періоду використано 2 групи віком від 10 до 120 років і періодом повторюваності в 10 та 5 років відповідно.

Результати, отримані при прогнозуванні, порівнювали з даними таблиць, які приймали за еталонні для даного віку та розраховували їхню абсолютну і відносну

2. Порівняння прогнозу росту середньої висоти з розробленими ТХР для модальних дубових деревостанів

Вік	Віковий проміжок, років																			
	від 10 до 120			10–60 та 60–120			від 10 із періодом 30 років			від 10 із періодом 15 років			від 10 із періодом 10 років			від 10 із періодом 5 років				
	висота за даними ТХР	прогноз	різниця	похибка, %	прогноз	різниця	похибка, %	прогноз	різниця	похибка, %	прогноз	різниця	похибка, %	прогноз	різниця	похибка, %	прогноз	різниця	похибка, %	
10	3,0																			
15	5,1																	5,0	-0,1	-2,0
20	7,2													7,0	-0,2	-2,8	7,1	-0,1	-1,4	
25	9,4										9,0	-0,4	-4,3				9,2	-0,2	-2,1	
30	11,4													11,2	-0,2	-1,8	11,4	0,0	0,0	
35	13,4																13,4	0,0	0,0	
40	15,2						14,9	-0,3	-2,0	15,4	0,2	1,3	15,4	0,2	1,3	15,4	0,2	1,3		
45	16,9																16,7	-0,2	-1,2	
50	18,5													18,2	-0,3	-1,6	18,4	-0,1	-0,5	
55	19,9										19,7	-0,2	-1,0				20,0	0,1	0,5	
60	21,2				20,7	-0,5	-2,4							21,5	0,3	1,4	21,3	0,1	0,5	
65	22,4																22,2	-0,2	-0,9	
70	23,5						23,1	-0,4	-1,7	23,3	-0,2	-0,9	23,2	-0,3	-1,3	23,4	-0,1	-0,4		
75	24,4																24,5	0,1	0,4	
80	25,3													25,5	0,2	0,8	25,4	0,1	0,4	
85	26,1									26,4	0,3	1,1					26,2	0,1	0,4	
90	26,8												26,7	-0,1	-0,4		26,6	-0,2	-0,7	
95	27,5																27,3	-0,2	-0,7	
100	28,0						27,9	-0,1	-0,4	27,6	-0,4	-1,4	27,8	-0,2	-0,7		28,0	0,0	0,0	
105	28,5																28,5	0,0	0,0	
110	29,0													29,0	0,0	0,0	29,0	0,0	0,0	
115	29,4										29,5	0,1	0,3				29,5	0,1	0,3	
120	29,8	29,0	-0,8	-2,7	29,6	-0,2	-0,7	30,0	0,2	0,7	29,9	0,1	0,3	30,0	0,2	0,7	29,9	0,1	0,3	

похибку. Це дало змогу проаналізувати поведінку функції на різних часових проміжках росту насадження.

Для прикладу наведемо таблицю порівняння прогнозу росту за середніми висотами із розробленими ТХР для модальних деревостанів дуба звичайного в табл. 2 та для бука лісового в табл. 3.

Аналіз даних наведених таблиць показав, що отримані математичні моделі прогнозу росту досить точно описують досліджувані нормативи ходу росту, зокрема, довготерміновий прогноз на 110 років (від віку 10 років до 120 років) дає похибку для дуба – 2,7 %, для бука – 3,9 %. Зі зменшенням періоду прогнозу похибка зменшується, виняток стано-

вить середньотерміновий прогноз із періодом у 15 років із віку 10 років до віку 25 років, за якого для дуба похибка складала 4,3 %, а для бука – 5,1 %. Короткотермінові прогнози показують, на яких вікових етапах моделювання можливі більші чи менші відхилення від досліджуваних таблиць. Найбільший відсоток похибок припадає на вік молодняків, навіть за прогнозу на 5 років для бука лісового у віці із 10 до 15 років похибка становить 5,6 %. Хоча в абсолютних показниках це відхилення є незначними і навіть за найтривалішого прогнозу на 110 років становить менше ніж один метр.

Висновки і перспективи. Проведення вдосконалення методики моделюван-

3. Порівняння прогнозу росту середньої висоти з розробленими ТХР для модальних букових деревостанів

Вік	Висота за даними ТХР	Віковий проміжок, років																		
		від 10 до 120			10–60 та 60–120			від 10 із періодом 30 років			від 10 із періодом 15 років			від 10 із періодом 10 років			від 10 із періодом 5 років			
		прогноз	різниця	похибка, %	прогноз	різниця	похибка, %	прогноз	різниця	похибка, %	прогноз	різниця	похибка, %	прогноз	різниця	похибка, %	прогноз	різниця	похибка, %	
10	1,8																			
15	3,6																	3,4	-0,2	-5,6
20	5,6														5,4	-0,2	-3,6	5,6	0,0	0,0
25	7,8										7,4	-0,4	-5,1					7,6	-0,2	-2,6
30	9,9														9,6	-0,3	-3,0	9,8	-0,1	-1,0
35	12,1																	11,9	-0,2	-1,7
40	14,1							13,4	-0,7	-5,0	13,8	-0,3	-2,1	13,9	-0,2	-1,4	14,1	0,0	0,0	
45	16																	16,1	0,1	0,6
50	17,8														18,1	0,3	1,7	17,9	0,1	0,6
55	19,4										19,6	0,2	1,0					19,3	-0,1	-0,5
60	20,9				20,0	-0,9	-4,3								20,8	-0,1	-0,5	20,9	0,0	0,0
65	22,3																	22,4	0,1	0,4
70	23,5							23,9	0,4	1,7	23,6	0,1	0,4	23,6	0,1	0,4	23,5	0,0	0,0	
75	24,6																	24,5	-0,1	-0,4
80	25,6														25,5	-0,1	-0,4	25,6	0,0	0,0
85	26,5										26,5	0,0	0,0					26,6	0,1	0,4
90	27,3														27,6	0,3	1,1	27,5	0,2	0,7
95	28,1																	27,8	-0,3	-1,1
100	28,7							28,5	-0,2	-0,7	28,5	-0,2	-0,7	28,3	-0,4	-1,4	28,6	-0,1	-0,3	
105	29,3																	29,2	-0,1	-0,3
110	29,8														29,7	-0,1	-0,3	29,8	0,0	0,0
115	30,2										30,2	0,0	0,0					30,3	0,1	0,3
120	30,6	29,4	-1,2	-3,9	30,7	0,1	0,3	30,7	0,1	0,3	30,7	0,1	0,3	30,8	0,2	0,7	30,7	0,1	0,3	

ня прогнозу росту за основними таксаційними показниками з використанням уніфікованого загального співвідношення значень таксаційного показника рік уперед до цього самого показника зараз, помноженого на вік, дало можливість отримати максимально точні моделі прогнозу росту з коефіцієнтом детермінації

рівним 1,0. Зручним є застосування однієї уніфікованої формули для деревостанів різних деревних видів, складом і походженням насаджень, а також класів бонітету. Запропоновану методику можливо застосовувати для прогнозування зміни таксаційних показників деревостанів будь-яких нормативних таблиць.

Список літератури

- Bala, O. P. (2016). Current state and productivity of ash stands in Ukraine. *Scientific bulletin of NULES of Ukraine, series "Forestry and park gardening"*, 255, 11–18 [in Ukrainian].
- Bala, O. P. (2019). *Modeling of growth and productivity of hardwood stands species of Ukraine*. Kyiv: Komprint [in Ukrainian].
- Catalog of application software focused on the processing of forest inventory information by means of a PC class IBM PC (Development of the algorithmization and programming party 1994–2000)*. (2000). Kyiv: State Forestry Committee of Ukraine [in Ukrainian].

- Handbook of the forest fund of Ukraine (according to the materials of the state forest inventory as of 01.01.2011)* (2012). Irpin [in Ukrainian].
- Hirs, O. A., Novak, B. I., & Kashpor, S. M. (2004). *Forest inventory. Textbook*. Kyiv: Aristei [in Ukrainian].
- Lakyda, P. I., & Bala, O. P. (2012). *Actualization of growth parameters of artificial Oak stands of Forest-Steppe of Ukraine's*. Korsun-Shevchenkivskyi: FOP Havryshenko V. M. [in Ukrainian].
- Lakyda, P. I., Oborska, A. E., Blyshchuk, I. V., & Smolin, V. O. (2020). *Prognosis of growth dynamic of alder modal stands of Western Polissya of Ukraine*. Korsun-Shevchenkivskyi: FOP Maydachenko I. S. [in Ukrainian].
- Lakyda, P. I., Terentiev, A. Yu., & Vasylyshyn, R. D. (2012). *Scots pine stands of artificial origin in Ukrainian Polissya – growth and productivity forecast*. Korsun-Shevchenkivskyi: FOP Maydachenko I. S. [in Ukrainian].
- Lakyda, P. I., & Aleksiiuk, I. L. (2017). *Natural pine forest stands of Ukrainian Polissya: growth and productivity forecast*. Korsun-Shevchenkivskyi: FOP Maydachenko I. S. [in Ukrainian].
- Lakyda, P. I., & Atamanchuk, R. V. (2014). *Forecast and productivity of modal birch stands in Ukrainian Polissya*. Korsun-Shevchenkivskyi: FOP Havryshenko V. M. [in Ukrainian].
- Lakyda, P. I., & Volodymyrenko, V. M. (2008). *Artificial spruce stands of the Ukrainian Carpathians – growth and productivity forecast*. Kyiv: ESC IAE [in Ukrainian].
- Shvets, M. I. (1997). The transition of domestic forest management to the technology of continuous forest inventory. In *Materials of the international conference "Forestry science and education: status and prospects for development"* (pp. 250–252) [in Ukrainian].
- Strochinskiy, A. A. (1992). *Methodological and normative-informational support of the system of regulation of the productivity of forest plantations in Ukraine* (Abstract of Doctoral dissertation). Ukrainian Academy of Agriculture, Kiev, Ukraine [in Russian].

Bala, O. P. (2020). To the methods for actualization of main stands parameters of hardwood tree species of Ukraine. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 11 (3), 4–14. <https://doi.org/10.31548/forest2020.03.001>

Continuous forest inventory, as one of the methods of forest management of the country, in contrast to the basic inventory, has a number of advantages, which primarily provide the opportunity to obtain the most complete and reliable information about the current state of the forest, as it provides annual updates of main stands parameters of forest found on Ukraine. Hardwood tree species (oak, ash, beech, hornbeam, etc.) occupy a special place among all that grow in Ukraine and occupy almost 44 % of the forest area covered with forest vegetation. According to the latest state forest inventory as of 01.01.2011, hardwood tree species are dominated by oak stands – 62.6 % of the area of all hardwood tree species, forest beech – 20.2 %, hornbeam – 3.2 % and ash ordinary, forming mainly mixed stands with oak. A systematic approach to the effective solution of the problem of continuous forest inventory requires the development of objective methods and mathematical models for updating the main stands parameters of forests. In Ukraine, for actualization main stands parameters, two methods have been developed to forecast their growth. The first is based on modeling the percentage of current increment by average height and wood stock, the second – on the developed dynamic site index curves and yield tables for modal stands. The aim of the work is to improve the methodological approaches to modeling the growth prognosis of the main stands parameters by the second method. To achieve these goals used the method of nonlinear regression using IBM SPSS Statistics. As a result of the conducted researches it was offered to model a new unified ratio of the stands parameter a year ahead to the same stands parameter now multiplied by the age of the stand to model the growth prognosis for all stands parameters. This made it possible during the simulation to describe the changes in growth by the main stands parameters with almost absolute accuracy (the coefficient of determination of the obtained models is 1.0). The equation obtained for growth prognosis has the same form for stands of all tree species, of different origin, composition and site index classes.

Keywords: *growth prognosis, mathematical models, modal stands, origin of stands, nonlinear regression.*

Отримано: 2020-08-18

ВИЗНАЧЕННЯ ВИСОТИ ДЕРЕВ ЗА ДАНИМИ РАСТРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ РІЗНОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ

П. П. ДЯЧУК, аспірант*

Національний університет біоресурсів і природокористування України
<https://orcid.org/0000-0003-2801-4546>, e-mail: diachuk@nubip.edu.ua

Збирання інформації про ріст і розвиток дерев є основою для планування господарських заходів у лісовому та садово-парковому господарстві, актуальність і достовірність таких даних дає змогу ефективно провести лісо- та парко-інвентаризаційні роботи. На сьогодні в Україні вимірювання висоти ростучих дерев та чагарників у більшості випадків здійснюється висотомірами. Розвиток технологій використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та методів оброблення зібраної інформації дає змогу перейти на інший рівень якості та точності зібраної інформації.

Метою дослідження було розглянути можливості визначення висоти дерев за матеріалами аерофотозйомки, отриманими за допомогою БПЛА, та оцінити точність отриманих показників із моделей висоти крон (СНМ) різної роздільної здатності.

Використано методи створення цифрової моделі висоти крон з аерофотознімків, отриманих за допомогою БПЛА. Створено вісім цифрових моделей рельєфу та місцевості для розрахунків СНМ. Аналіз растрових зображень було виконано за допомогою програмного забезпечення ArcGIS пакета інструментів «Spatial Analyst» із використанням фільтра «Focal statistics». Встановлені значення висоти дерев порівнювали з реальними показниками, які одержано способом прямого вимірювання звалених модельних дерев із додаванням висоти пня.

Відображено чотири з восьми розрахованих СНМ із накладанням модельних дерев у системі координат WGS 84 / UTM зона 36N (EPSG::32636). Описано зміну таксаційних показників висоти дерев сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.) та можливість їх ідентифікації у насадженні за допомогою СНМ різної роздільної здатності. Проаналізовано показники висоти для модельних дерев, які отримані з СНМ різної роздільної здатності. В результаті чого встановлено, що растри з роздільною здатністю 0,04 м/пікс та 0,1 м/пікс мають найменші відхилення показників висоти у деревостані порівняно з фактичними значеннями. Відносні відхилення середніх арифметичних висоти дерев на цих растрах становили 2,3 % та 2,6 %.

Растрові зображення з роздільністю понад 0,3 м/пікс не дають змоги ідентифікувати верхівку дерева, також збільшується значення похибки у визначенні висоти дерев. У цьому досліді для растрового зображення СНМ із роздільною здатністю в 1 м/пікс похибка вимірювання становила понад 17 %, і вона зростає зі зниженням роздільної здатності, що перевищує допустимі відхилення для визначення висоти дерев згідно з чинними інструкціями з упорядкування лісового фонду в Україні.

Ключові слова: модель висоти крон, цифрова модель місцевості, цифрова модель рельєфу, безпілотний літальний апарат, сосна звичайна, хмара точок.

Актуальність. Сучасні вимоги суспільства до точності та актуальності інформації про лісові ресурси потребують перегляду методів таксації лісу, що застосовують на практиці. У системі лісовпорядкування нашої країни переважно

використовують окомірний метод, точність якого складно піддається кількісній оцінці. Удосконалення методів обліку лісових ресурсів можливе тільки з використанням об'єктивних даних лісової інвентаризації, точність яких відома та

* Науковий керівник – доктор сільськогосподарських наук, проф. А. М. Білоус.

планується заздалегідь (Myroniuk et al., 2018). Упровадження дистанційного збору даних у практику лісової інвентаризації є однією з основних сучасних тенденцій розвитку лісооблікових методів. Дистанційні технології дали змогу зменшити витрати на проведення польових робіт і додали статистичним оцінкам просторову складову у вигляді карт, що відображають видовий склад лісів і розподіл окремих біофізичних параметрів деревостанів (сума площ перерізів, запас і біомаса) (Myroniuk et al., 2019).

Розвиток безпілотних авіаційних систем і сенсорів збирання даних робить їх застосування доступнішим і відкриває нові перспективи для використання. У поєднанні з розвитком програмного забезпечення (ПЗ), вдосконалюються методи та алгоритми оброблення, що підвищують якість зібраних даних про ліс (Litkey et al., 2004; H. Liu, & Dong, 2014; L. Liu et al., 2019). Дослідження таксаційних показників про ліси пов'язане не тільки з потребою у економічному аналізі лісового господарства, а й із проблемами збереження біорізноманіття та вразливості лісових екосистем в умовах змін клімату. Найбільш перспективним підходом для оцінювання таксаційної характеристики лісу залишається лазерне сканування, однак обладнання невеликих розмірів, яке придатне для використання на БПЛА, є дорогим і обмежуються декількома виробництвами (Frey et al., 2018), а застосування оптичних сенсорів є найбільш поширеним у сучасних умовах.

Нині у лісовій таксації використовують багато методів вибіркового вимірювань, які мають відмінності в теоретичній основі, методиці польових робіт, а також технології оброблення результатів. В умовах, коли в Україні широко обговорюють доцільність запровадження національної лісової інвентаризації на статистичній основі, науковий аналіз різних підходів щодо вибіркової таксації лісу є

особливо актуальним (Myroniuk et al., 2018). У зв'язку з цим, у роботі проведено порівняння результатів визначення висоти за растровими зображеннями різної роздільної здатності, що отримані в результаті оброблення даних, зібраних за допомогою БПЛА, як можливої складової процесу виконання лісоінвентаризаційних робіт.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Висота деревних і чагарникових рослин є важливим таксаційним показником, який використовують для визначення об'єму стовбурів, запасу деревостану, бонітету, приросту та аналізу росту насаджень (Bidolakh et al., 2019). Вимірювання висоти дерев висотомірами проводять із використанням ручних вимірювальних приладів, робота яких побудована на класичних принципах геометрії, тригонометрії та оптики. З розвитком техніки для вимірювання висоти почали використовувати ультразвукові та лазерні прилади, що підвищило точність вимірювань та зменшило затрати часу.

На сьогодні поєднання оптичних і лазерних технологій для вимірювань має широке використання у дистанційному зондуванні Землі (ДЗЗ), і це стосується не лише супутників на орбіті, а й сенсорів для БПЛА. У дослідженнях (Guimarães et al., 2020) наведено переваги, які роблять БПЛА одним із найкращих варіантів для збирання даних ДЗЗ у процесі управління лісовими ресурсами.

Дистанційне зондування Землі за останні кілька десятиліть було одним із найпривабливіших напрямів досліджень. За допомогою відбитої та випромінюваної енергії методи ДЗЗ вимірюють різні фізичні властивості земної поверхні (Joseph, 2011; Roy et al., 2017). Значний поштовх для удосконалення методів оброблення даних ДЗЗ отримало з розвитком геоінформаційних і глобальних навігаційних супутникових систем, що

додатково вплинуло на можливості його використання (Emeru, & Camps, 2017).

Використання БПЛА та оптичних сенсорів дає змогу отримувати зображення надвисокої роздільної здатності, які поєднуються з даними географічно-просторового розміщення сенсора під час зйомки. За допомогою комп'ютерного стереобачення (Computer stereo vision), порівнюючи два або більше зображень об'єкта, можна отримати 3D інформацію про нього.

У результаті оброблення методами стереофотограмметрії розраховують хмару точок та похідні 3D моделі, які можна використати для автоматичного визначення та картографування таксаційних показників деревостану, зокрема висоти як ключового показника. Хмара точок є основою для створення цифрової моделі висоти пологу лісу, з якої за допомогою алгоритмів фільтрації максимальних значень та плаваючих функцій можна ідентифікувати дерево в насадженні та встановити його висоту. Тим не менш, такий підхід має недоліки, зокрема, помилки у детектуванні низьких дерев під пологом лісу та помилкове виділення верхівок дерев, що розташовані в межах радіуса фільтрації (Holiaka et al., 2018). Частково це можна вирішити завдяки комплексному використанню точкових хмар під час літніх і зимових обстежень за незалежної обробки СНМ у лісових насадженнях із різною густиною (Medvedev et al., 2020).

У лісовій практиці для вимірювання висоти дерев усе частіше починають використовувати методи, які базуються на використанні тривимірного моделювання, ортофото, цифрової моделі місцевості (DSM), цифрової моделі рельєфу (DEM) та хмари точок (Wada, 2017). СНМ, яке будується на різниці між DEM і DSM, широко використовують для оцінювання продуктивності надземної фітомаси (Forsman et al., 2016). У сільському господарстві за допомогою растрових

зображень СНМ оцінюють біомасу зернових культур. Отримання показників висоти рослин та їх приросту має важливе значення для точного землеробства, керування внесенням добрив та прогнозування врожайності (Fengabcd et al., 2018).

У дослідженнях лісових масивів на радіоактивно забруднених територіях СНМ використовують для ідентифікації та вимірювання висоти деревостанів (D. Holiaka et al., 2018), що дасть змогу в подальшому уникнути додаткового опромінення таксаторів, під час проведення лісовпорядних робіт на території ДСП «Північна пуща», Чорнобильського радіаційно-екологічного біосферного заповідника та інших частин лісового фонду України, які зазнали радіаційного забруднення. Також у дослідженні (D. Holiaka et al., 2018) наголошується на вимірюванні верхньої висоти деревостану, яка має важливіше значення ніж середня висота (Strochinskiy, 1992).

Існує спосіб визначення висоти дерева за допомогою бортового оснащення БПЛА, яке дає змогу проводити пряме вимірювання висоти. Таке застосування допомагає отримати оперативну інформацію безпосередньо в польових умовах та не потребує спеціалізованого ПЗ для оброблення даних (Bidolakh et al., 2018).

Використання БПЛА в лісовому господарстві України спрямоване на патрулювання територій підприємства для виявлення порушень у використанні лісових ресурсів, локалізації та оперативного керування під час гасіння лісових пожеж та спостереження за тваринами. Таксація запасу деревини насаджень за допомогою БПЛА наразі не має широкого використання.

Мета дослідження – встановити можливість визначення висоти дерев зі зменшенням роздільної здатності СНМ, сформованих на основі щільної хмари точок для соснових деревостанів неоднорідної густоти.

Матеріали і методи дослідження.

Матеріали дослідження зібрані під час польових досліджень у ДП «Ніжинське лісове господарство» на території Іржавецького лісництва (30 квартал, 9 виділ) Чернігівської області (N50°59'24,0187 E31°23'34,6489).

Об'єкт дослідження – висота дерев сосни звичайної у деревостані неоднорідної густоти. Контрольне вимірювання модельних дерев проводили після звалювання за допомогою мірної стрічки та лазерно-оптичного вимірювального приладу PD-520N. Діаметри були виміряні мірною вилкою «Mantax Precision Blue» (Haglof, Швеція).

Аерофотозйомку лісового масиву проводили БПЛА Phantom 4 Pro базової комплектації. Виконано два полігональні прольоти з перекриттям знімків 80 % за допомогою ПЗ Pix4Dcapture. Відзнято 81 сцену, серед яких 24 з висоти 70 метрів і 57 із 90 метрів.

Для оброблення фотоматеріалів було використано ПЗ Agisoft Metashape, де було проведено вирівнювання фотографій, створення щільної хмари точок та їх класифікації. Створено цифрову модель рельєфу та цифрові моделі місцевості, з різниці яких було визначено модель висоти крон для растрових зображень різної роздільної здатності.

Одержані растри зберігали у форматі TIFF із системою координат WGS 84 / UTM зона 36N (EPSG::32636).

Максимальні значення висоти дерев визначали за допомогою ПЗ ArcGIS, пакета інструментів «Spatial Analyst» із використанням фільтра «Focal statistics» (D. Holiaka et al., 2018). Встановлено координати верхівок дерев із радіусом пошуку максимальних значень 0,75 м на вихідному растрі СММ із максимально доступною роздільною здатністю 0,04 м/пікс. Отримані координати накладали на інші растрові зображення СММ та зчитували атрибутивну інформацію про висоту для модельного дерева. Наданий

унікальний номер дерев було нанесено на їхню кору у такий спосіб, щоб він зчитувався на аерофотознімках.

Для розуміння та спрощення сприйняття рисунків СММ на них було нанесено координатну сітку зверху та по лівому краю, номери модельних дерев згідно з їх розташуванням на дослідній ділянці, умовну позначку з підписом «Н, м», яка відображає розраховане значення висоти.

Результати досліджень та їх обговорення. У результаті оброблення 81 аерофотознімка було розпізнано близько 774 900 сполучних точок, на основі яких збудовано щільну хмару з понад 28,5 млн точок. Створено вісім моделей DEM і вісім моделей DSM, розраховано вісім СММ, чотири з них, найбільш репрезентативні, подано на рис. 1–4, де, зокрема, відображено фактичне розміщення верхівок модельних дерев на дослідній ділянці та винесено їхні порядкові номери.

Аналіз СММ із роздільною здатністю 0,04 м/пікс (рис. 1), за допомогою ПЗ ArcGIS (пакета інструментів «Spatial Analyst») з використанням фільтра «Focal statistics», відображає найменші втрати показника висоти модельних дерев у насадженні. Відносне відхилення для середнього арифметичного значення висоти дерев становило 2,3 %. Аналогічний показник, розрахований для СММ із роздільністю 0,1 м/пікс, на 0,3 % перевищує попередній показник.

Растрові зображення СММ із роздільною здатністю понад 1 м/пікс (рисунки 3 і 4) неефективні для використання, оскільки спричиняють похибку вимірювання понад 10 %, що перевищує допустимі відхилення у визначенні таксаційних показників згідно з «Інструкцією зі впорядкування лісового фонду України» (Instructions for arranging, 2014). Втрачається можливість ідентифікації дерева та його верхівки стереофотограмметричними методами.

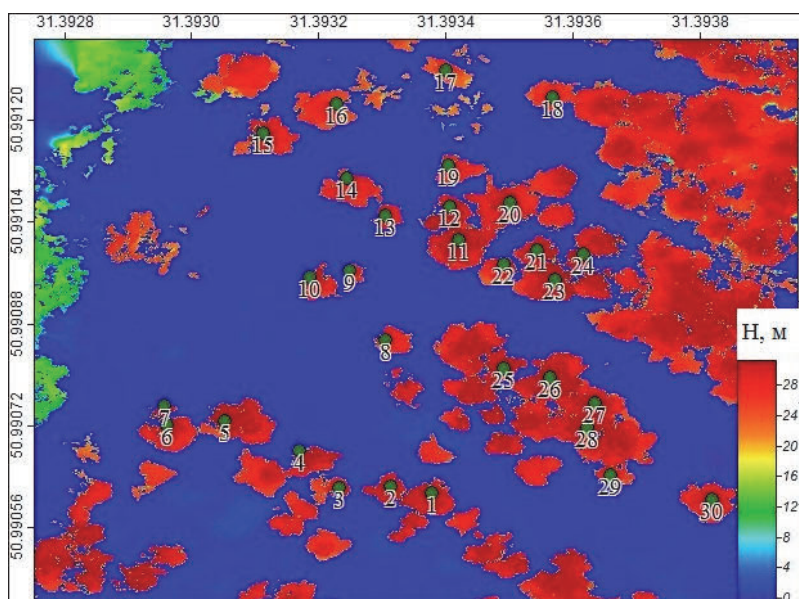


Рис. 1. СНМ із роздільною здатністю 0,04 м/пікс

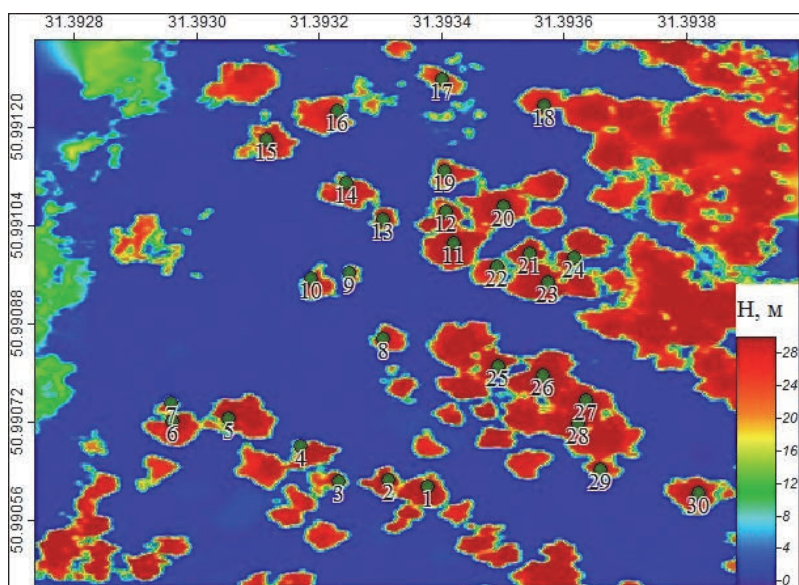


Рис. 2. СНМ із роздільною здатністю 0.3 м/пікс

Побудова контуру крони залишається доступною з роздільною здатністю до 0,3 м/пікс, це необхідно для визначення зімкнутості намету дерево-стану. Аналіз отриманих значень висоти

дерев підтверджує систематичний характер відхилень у визначенні показників, що наголошується для даних, зібраних за допомогою БПЛА у цьому дослідженні (Bidolah et al., 2020).

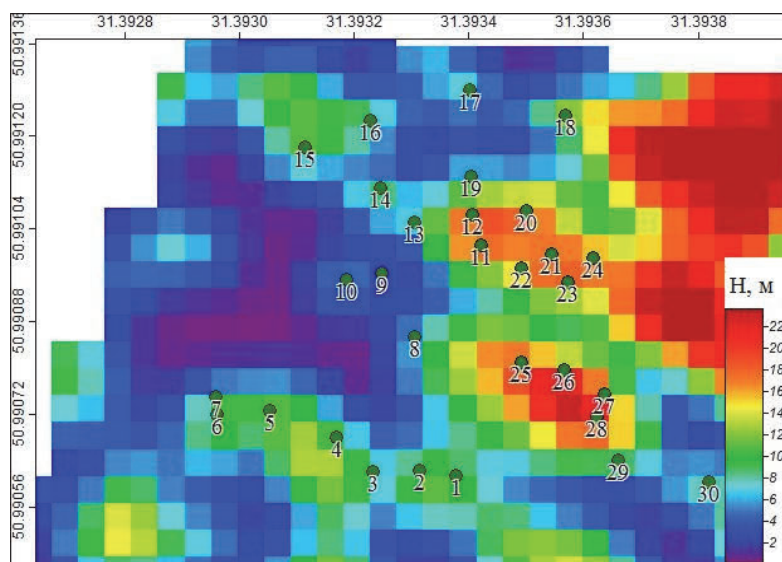


Рис. 3. СМН із роздільною здатністю 5 м/пікс

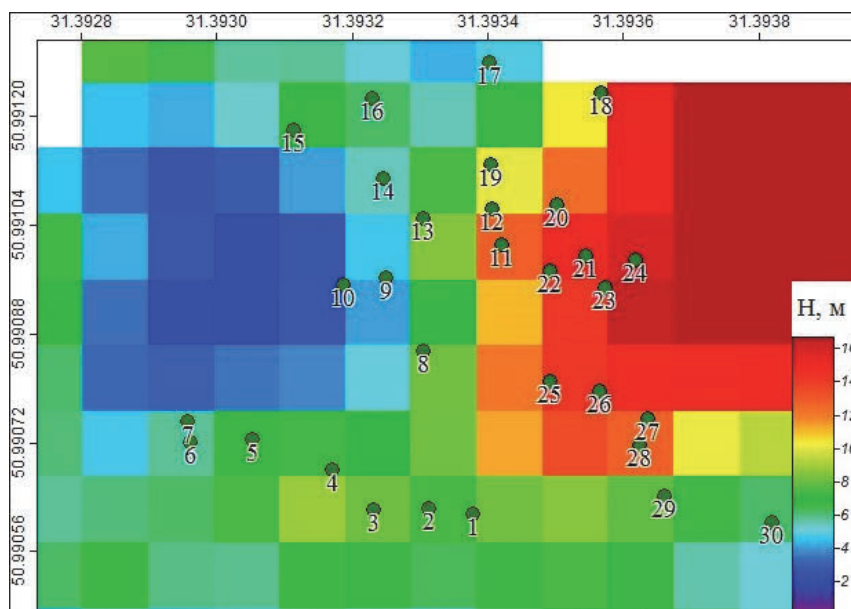


Рис. 4. СМН із роздільною здатністю 10 м/пікс

Загалом було враховано 240 значень висот модельних дерев (табл. 1) із растрових зображень СМН роздільної здатності від 4 см/пікс до 30 м/пікс. Діаметри на висоті груди та істинні значення

висоти дерев були отримані наземними вимірюваннями під час польових робіт.

Аналіз одержаних результатів (табл. 2) відображає зменшення середнього арифметичного значення висоти модельних

1. Дані висоти модельних дерев на СНМ різної роздільної здатності

№ модельного дерева	Діаметр, см	Роздільна здатність растрового зображення СНМ								Істинне значення висоти дерева, м
		4 см/пікс	10 см/пікс	30 см/пікс	1 м/пікс	3 м/пікс	5 м/пікс	10 м/пікс	30 м/пікс	
1	48	32,06	32,05	31,88	30,01	16,62	10,47	6,93	7,97	33,06
2	40	31,57	31,56	31,29	29,72	17,63	9,46	7,14	7,57	32,43
3	41	28,72	28,72	28,64	25,55	15,93	7,91	9,54	6,85	29,59
4	48	33,04	32,98	23,45	15,71	12,17	11,35	9,00	6,77	34,09
5	58	33,51	33,47	33,06	31,92	21,10	11,41	7,54	5,85	34,35
6	53	32,93	32,92	31,47	27,85	17,95	12,00	5,90	4,83	33,47
7	44	32,33	32,28	26,90	17,50	7,75	8,28	4,62	4,84	33,22
8	38	29,69	29,71	28,91	22,95	7,32	4,63	4,73	8,72	30,73
9	34	31,11	29,63	26,42	16,71	7,21	3,85	3,50	9,13	32,37
10	46	32,30	32,28	26,88	19,63	10,64	6,32	2,23	8,85	33,81
11	56	34,54	34,53	34,30	33,73	24,86	20,89	12,37	9,49	35,22
12	52	33,87	33,82	33,10	28,03	18,38	19,03	9,86	9,49	34,45
13	38	29,90	29,88	29,68	23,98	7,82	6,27	5,63	9,49	30,48
14	51	29,51	29,16	26,94	19,06	10,23	10,04	4,83	9,49	30,50
15	59	31,72	31,70	31,29	27,81	14,77	12,35	6,05	9,49	32,33
16	42	30,06	30,02	27,22	22,93	18,92	9,70	7,07	9,49	29,67
17	38	27,83	27,78	27,29	25,72	14,04	10,47	3,91	9,49	28,71
18	39	29,48	29,47	29,05	28,21	15,36	13,60	8,53	9,49	29,73
19	39	29,82	29,81	28,92	23,21	11,48	8,55	7,42	9,49	30,45
20	51	33,94	33,93	33,50	32,03	23,57	17,25	12,72	9,49	34,88
21	44	34,73	34,63	33,75	32,31	16,47	17,66	15,64	9,47	35,60
22	32	30,61	30,60	30,35	27,56	18,97	14,76	14,66	9,42	31,32
23	48	34,74	34,75	34,53	32,67	25,70	18,28	14,81	9,38	36,33
24	49	33,96	33,95	30,17	24,93	17,95	17,90	15,27	9,45	34,70
25	39	34,66	34,63	34,22	32,36	22,19	18,81	14,65	9,10	35,90
26	57	36,04	36,02	35,71	33,19	25,08	18,69	14,28	9,08	35,48
27	45	32,98	32,93	32,55	31,87	25,88	20,96	15,27	8,99	33,70
28	41	34,35	34,31	34,14	33,36	28,30	24,83	16,17	8,93	35,30
29	40	30,10	30,07	29,81	26,69	13,33	10,40	8,82	8,70	30,23
30	53	31,20	31,20	31,09	30,54	18,05	7,89	5,63	8,03	31,98

дерев. Відповідно зростають похибки вимірювань, які характеризуються значною недооцінкою висоти дерев. Така тенденція зберігається для кожного наступного растрового зображення зі зменшенням роздільної здатності (рис. 5), основою яких є одна й та сама щільна хмара точок.

Середнє арифметичне при аналізі істинних значень висоти для 30 модельних

дерев склало 32,8 м, найближчими до нього є значення 32,04 м (табл. 2, рис. 5) яке отримано із растрового зображення з роздільною здатністю 4 см/пікс та 31,96 м для растра – 10 см/пікс (табл. 2, рис. 5).

Характерним для всіх моделей СНМ є систематичне зменшення значень висоти. Як свідчить аналіз індивідуальних показників дерев № 11 і № 13 (табл. 1),

2. Статистичні показники

Статистичні показники	Роздільна здатність СНМ, м/пікс							
	0,04	0,1	0,3	1	3	5	10	30
Середнє арифметичне значення, м	32,04	31,96	30,55	26,92	16,85	12,80	9,16	8,56
Похибка вимірювання, м	-0,76	-0,84	-2,25	-5,88	-15,95	-20,00	-23,65	-24,24
Відносна похибка, %	2,3	2,6	6,9	17,9	48,6	61,0	72,1	73,9

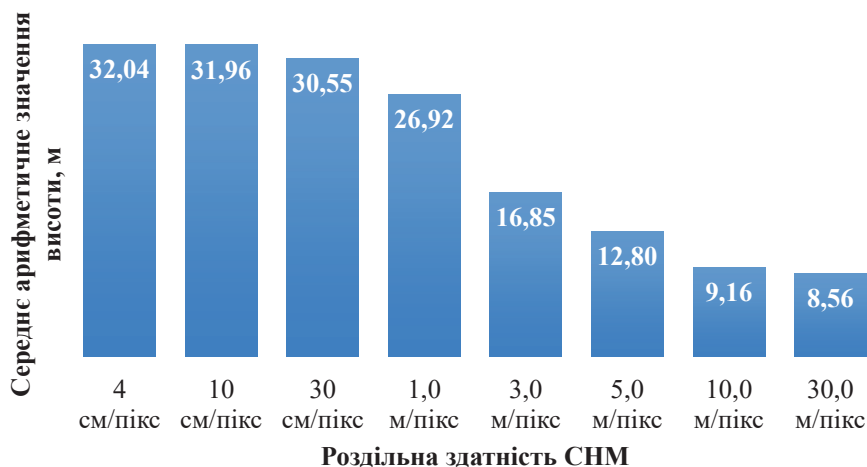


Рис. 5. Середні арифметичні значення висоти модельних дерев за різної роздільної здатності СНМ

у першому випадку відбувається поступове зменшення, в другому – різке. Зокрема, за порівняння послідовних растрів роздільної здатності в 1,0 та 3,0 м/пікс для модельного дерева № 13 відмінність становила понад 3 рази за висотою дерева за встановленими координатами верхівки цього дерева. Разом з тим, попередні та наступні значення не мали такої суттєвої різниці між собою. Візуальний аналіз растрів (рисунки 1 і 3) дає можливість висунути припущення, що така велика розбіжність у показниках може бути спричинена розмірами крони. Через це потрібна додаткова експериментальна робота з використання растрових зображень СНМ різної роздільної здатності та глобальних карт висоти пологів лісу (Hansen et al., 2013) для визначення висоти дерев або її якісного прогнозування.

Висновки і перспективи. За результатами дослідження можна стверджувати, що чим вища роздільна здатність растрових зображень, тим вища точність одержаних результатів. Зокрема це стосується і хмари точок, яка є основою для розрахунку цифрової моделі місцевості та цифрової моделі рельєфу, тобто чим вища щільність такої хмари, тим більша точність отриманої моделі, за умови рівномірності розташування точок у хмарі за об'єктом інтересу. За даними виконаних досліджень обґрунтовано неефективність використання растрових зображень СНМ низької роздільної здатності для встановлення висоти ростучого дерева в насадженні. Відповідно перевірка отриманих результатів відображає збільшення помилки визначення висоти у разі зменшення роздільної здатності растрового зображення.

Список літератури

- Bidolakh, D. I., Bilous, A. M., & Kuzevich, V. S. (2020). Determination of the canopy density of forest stand by the materials of UAV survey. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 11 (1), 13–23. <https://doi.org/10.31548/forest2020.01.013> [in Ukrainian].
- Bidolakh, D. I., Bilous, A. M., & Kuzyovych, V. S. (2018). Measurement of the tree and shrub height with the help of unmanned aerial vehicles. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28 (1), 24–27. <https://doi.org/10.15421/40280104> [in Ukrainian].
- Bidolakh, D. I., Bilous, A. M., & Kuziovych, V. S. (2019). The accuracy of measuring the height of trees with the use of a quadcopter. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 10 (3), 19–26. <https://doi.org/10.31548/forest2019.03.019> [in Ukrainian].
- Emery, W. J., & Camps, A. (2017). *Introduction to satellite remote sensing: Atmosphere, ocean, land and cryosphere applications*. <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=1158605>
- Fengabcd, H., Panabe, L., Yan, F., Peiabg, H., Wang, H., Yang, G., Liuabg, M., & Wuabg, Z. (2018). Height and Biomass Inversion of Winter Wheat Based on Canopy Height Model. *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 7711–7714. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518726>
- Forsman, M., Börllin, N., & Holmgren, J. (2016). Estimation of Tree Stem Attributes Using Terrestrial Photogrammetry with a Camera Rig. *Forests*, 7 (12), 61. <https://doi.org/10.3390/f7030061>
- Frey, J., Kovach, K., Stemmler, S., & Koch, B. (2018). UAV Photogrammetry of Forests as a Vulnerable Process. A Sensitivity Analysis for a Structure from Motion RGB-Image Pipeline. *Remote Sensing*, 10 (6), 912. <https://doi.org/10.3390/rs10060912>
- Guimarães, N., Pádua, L., Marques, P., Silva, N., Peres, E., & Sousa, J. J. (2020). Forestry Remote Sensing from Unmanned Aerial Vehicles: A Review Focusing on the Data, Processing and Potentialities. *Remote Sensing*, 12 (6), 1046. <https://doi.org/10.3390/rs12061046>
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., et al. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342 (6160), 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Holiaka, D., Kato, H., Yoschenko, V., Igarashi, Ya., Onda, Yu., Holiaka, M., Gumeniuk, V., Lesnik, O., et al. (2018). Identification and estimation of heights of the scots pine trees in the chernobyl exclusion zone using stereophotogrammetry method. *Abstracts of Reports of the Participants of the International Scientific-Practical Conference 'Problems of Development of Forest Taxation, Forest Management and Forest Inventory', December 6–8, 2018*, 21–22. Available at https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u32/zbirnik_tez_mizhnarodnoyi_konferenciyi_nikitina_k.ie__6-7.12.18r.pdf [in Ukrainian].
- Holiaka, D., Kato, H., Yoschenko, V. I., Igarashi, Ya., Onda, Yu., Avramchuk, O. O., Holiaka, M. A., Humenyuk, V. V., & Lesnyk, O. M. (2018). Identification and estimation of heights of scots pine trees in forest stands in the chernobyl exclusion zone using stereophotogrammetry method. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28 (10), 18–21. <https://doi.org/10.15421/40281003> [in Ukrainian].
- Joseph, G. (2011). *Fundamentals of remote sensing* (2. ed., reprinted). Universities Press.
- Litkey, P., Yu, X., Hagrén, H., Rönholm, P., Pyysalo, U., Pitkänen, J., & Maltamo, M. (2004). *Algorithms and Methods of Airborne Laser Scanning for Forest Measurements*.
- Liu, H., & Dong, P. (2014). A new method for generating canopy height models from discrete-return LiDAR point clouds. *Remote Sensing Letters*, 5 (6), 575–582. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2014.938180>
- Liu, L., Lim, S., Shen, X., & Yebr, M. (2019). A multiscale morphological algorithm for improvements to canopy height models. *Computers & Geosciences*, 130, 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.05.012>
- Medvedev, A. A., Telnova, N. O., Kudikov, A. V., & Alekseenko, N. A. (2020). Use of photogrammetric point clouds for the analysis and mapping of structural variables in sparse northern boreal forests. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 17 (1), 150–163. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-1-150-163> [in Russian].
- Myroniuk, V., Bilous, A., Diachuk, P., & Fedyna, K. (2018). Accuracy of sample-based forest inventory obtained from different plot configurations. *Biological Resources and Nature Management*, 10 (5–6). <https://doi.org/10.31548/bio2018.05.018> [in Ukrainian].
- Myroniuk, V., Bilous, A., & Diachuk, P. (2019). Predicting forest stand parameters using the k-NN approach. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 10 (2), 51–63. <https://doi.org/10.31548/forest2019.02.051> [in Ukrainian].

- Roy, P. S., Behera, M. D., & Srivastav, S. K. (2017). Satellite Remote Sensing: Sensors, Applications and Techniques. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, 87 (4), 465–472. <https://doi.org/10.1007/s40010-017-0428-8>
- Strochinskiy, A. A. (1992). *Methodical and normative-information provision of a system for regulating the forest plantations productivity in Ukraine* (UACA). [in Ukrainian].
- Instructions for arranging the forest fund of Ukraine. (2014). Available at http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/publish/article?art_id=119314 [in Ukrainian].
- Wada, Y. (2017). Case Study of Forest Inventory using Drone for Deforestation and Forest Degradation Monitoring. *Journal of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, 56 (5), 191–195. <https://doi.org/10.4287/jsprs.56.191>

Diachuk, P. P. (2020). Determination of tree height according to data of raster images different resolution. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 11 (3), 15–24. <https://doi.org/10.31548/forest2020.03.002>

The collection of information on the growth and development of trees is the basis for planning forestry and horticulture, while the relevance and reliability of such data defines the quality of forest and park inventory outputs. Currently in Ukraine, the height of growing trees and shrubs is measured mostly by clinometer. The enhancement of unmanned aerial vehicles (UAVs) and methods of processing the collected information allow to amplify the level of quality and accuracy of the collected data.

Our goal was to consider the possibility of determining the height of trees based on aerial photography materials obtained by UAVs and to assess the accuracy of measured indicators modeling crown height at different spatial resolutions.

*Here we used methods of creating a digital canopy height model (CHM) from aerial photographs obtained by UAVs. We produced 8 digital elevation and terrain models for the calculation of CHM. Raster image analysis was performed using the ArcGIS software and Spatial Analyst toolkit using the Focal statistics filter. We have confirmed the possibility of CHM utilization to measure the height of trees in structurally homogeneous stands. Here we have shown the change of height values of Scots pine trees (*Pinus sylvestris* L.) and the deviation of the arithmetic mean value of the height for model trees applying the raster images with different spatial resolutions. Predicted tree heights were compared with the empirical values, which were obtained directly measuring the felled sample trees with the addition of stump height.*

CHM analysis with a cell size of 0.04 m² and 0.1 m² shows the smallest height deviations for model trees in the stand. The deviations relative to arithmetic mean were 2.3 % and 2.6 %. Raster images with a more coarse resolution (more than 1 m²) are not recommended in forest practice, since their utilizing entails a measurement error of 17% and higher, and thus exceeding the permissible deviations in tree height measurements according to the forest inventory guidelines currently applied in Ukraine.

Keywords: canopy height model, digital elevation model, digital terrain models, unmanned aerial vehicle, point cloud, Scots pine.

Отримано: 2020-08-25

ШУМОПОГЛИНАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРИДОРОЖНІХ ЛІСОВИХ СМУГ РІЗНИХ КОНСТРУКЦІЙ В УМОВАХ ЗАХІДНОГО ПОЛІССЯ

С. І. МАКСИМЦЕВ*, аспірант, <https://orcid.org/0000-0002-2390-0533>,
e-mail: msi.serhiy@nubip.edu.ua

С. М. ДУДАРЕЦЬ, кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
<https://orcid.org/0000-0002-9449-3023>, e-mail: dudarec@ukr.net
Національний університет біоресурсів і природокористування України

У теперішній час інтенсивного розвитку суспільства та підвищення антропогенного навантаження на екологічні системи зростає значення лісомеліоративних насаджень різного цільового призначення. Одним із видів таких насаджень є придорожні лісові смуги, які в умовах збільшення чисельності та інтенсивності руху автомобільного транспорту, особливо на автошляхах міжнародного та національного значення, забезпечують виконання низки важливих захисних функцій.

Наведено значення та актуальність використання придорожніх лісових смуг у контексті виконання ними шумопоглинальних функцій. Приділено увагу аналізу шумового навантаження від роботи великогабаритних транспортних засобів на автомагістралях міжнародного та національного значення в умовах Західного Полісся. Виконано аналіз останніх наукових публікацій з акцентуванням уваги на захисних насадженнях як ефективного засобі запобігання негативному акустичному навантаженню. Основною метою виконаних досліджень стало визначення шумопоглинальних властивостей придорожніх лісових смуг залежно від їхніх конструктивних особливостей та видового складу. Зазначено, що вирішення програмних завдань роботи проведено з використанням спеціальних методик досліджень шумопоглинального ефекту захисними лісовими насадженнями на шляхах транспорту. Виконано порівняльну характеристику шумопоглинального ефекту придорожніх лісових смуг і шумозахисних екранів. На підставі проведених досліджень розроблено математичні моделі, що описують зниження рівня шуму залежно від конструкції придорожніх лісових смуг. Узагальнення результатів експерименту показало, що найбільш якісним шумопоглинальним ефектом вирізняються придорожні смуги цільної та ажурної конструкції. Шумозахисні екрани у районі досліджень сприяють зниженню рівня шуму до 60 дБА та менше, чим забезпечують виконання необхідних санітарних норм для населених пунктів.

Ключові слова: рівень шуму, акустичне навантаження, шумомір, математична модель, шумозахисний екран.

Актуальність. Нині в усьому світі найпоширенішим джерелом надмірного шуму є транспортні потоки, які, за різними даними, покривають від 50 до 70 % територій населених місць (Manojkumar, Basha, & Srimuruganandam, 2019). Поряд із цим значну увагу приділяють будівництву нових та реконструкції наявних транспортних магістралей.

Це зумовлено, насамперед, необхідністю збільшення інтенсивності транспортних перевезень та поліпшення безпеки їх експлуатації. Однією із важливих вимог щодо безпечної експлуатації будь-яких будівельних об'єктів, до яких безпосередньо належать автомобільні та залізничні шляхи сполучення, є вимога «захист від шуму» (Directive, 1988).

* Науковий керівник – кандидат сільськогосподарських наук, доцент С. М. Дударець.

Сучасні методи боротьби з шумом можна поділити на чотири основні групи (ISO 1996-1:2016): зменшення шуму у джерелі; звукоізоляція; будівельно-планувальні заходи; інженерно-технічні засоби.

Шум навколишнього середовища, зокрема від об'єктів автомобільного транспорту, поширюється на великі території, урбанізовані зони та спричиняє дискомфорт для проживання людини. Особливо це стосується житлових масивів, які розташовані поруч із транспортними магістралями і розв'язками. Шумові хвилі досить інтенсивно поширюються на прилеглі території, де мають бути встановлені або створені захисні бар'єри. Під час виконання робіт із забезпечення належних умов проживання людини враховують багато факторів, одним із яких є рівень шумового навантаження. Це будь-які небажані звуки незалежно від їхньої природи та характеру походження, що викликають певний дискомфорт і можуть спричинити негативний вплив на здоров'я людини. Навіть за наявності помірних звукових потоків може погіршуватися працездатність, особливо під час розумового навантаження. Для мешканців житлових забудов нормативний рівень шуму має становити 45 і 55 дБА відповідно у нічний і денний час доби. Захист населення від шкідливої дії звукового тиску та регулювання акустичного навантаження на урбанізовані території регламентується низкою нормативно-правових актів.

Зважаючи на щорічне зростання джерел шумового навантаження, потрібно зазначити, що шумопоглинальний ефект захисних лінійних насаджень є досить важливим елементом транспортних магістралей країни. При цьому найбільш ефективним засобом захисту є смугові насадження уздовж шляхів залізничного та автомобільного сполучення. Важливим фактором, який визначає ефективність захисних властивостей смугових насаджень, є їхні конструктивні особливості.

Порівняно із повітрям рослини характеризуються більшим акустичним опором. Тому придорожні лісові смуги являють собою потужний екрануючий бар'єр на шляхах поширення звукових хвиль. Крони листяних деревних видів рослин можуть поглинати до 26 %, а розсіювати і відбивати – близько 74 % звукової енергії, що потрапляє на них. У зв'язку з цим придорожні лісові смуги виконують важливі функції щодо захисту населення від шумового забруднення.

Особливої актуальності ці питання набувають в умовах Західного Полісся, де проходить низка транспортних магістралей міжнародного і національного значення. Для цього природного регіону найпоширенішими функціями придорожніх лісових смуг є пониження швидкості вітру та снігозатримання, проте через збільшення чисельності транспортних засобів і шумового навантаження від їхньої роботи підвищується актуальність і шумопоглинальної функції таких насаджень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Численними дослідженнями встановлено, що одним із дієвих та ефективних засобів захисту транспортних магістралей від негативного впливу природних чинників, а також прилеглих територій від шкідливих викидів і шумового забруднення транспортних засобів є лісові ділянки різної просторової форми на основі принципу штучного бар'єру, які проєктують із використанням максимально можливого захисного ефекту (Pavlishyna, 2009; Sheludchenko, & Vasyk, 2010; Hladun, & Hladun, 2013).

У різний час пошуком оптимальних варіантів захисту автомобільних доріг від шумового забруднення з використанням придорожніх лісових смуг займалися (Bobin, 1964; Pavlishyna, 2011; Ugnenko, & Gavrish, 2015). Вони розглядали саме такі насадження як ефективний засіб запобігання негативному шумовому навантаженню незалежно від

джерел, які його утворюють. При цьому вони також вважали штучні смугові насадження ліпшим варіантом захисту.

Експериментальними дослідженнями доведено вплив рослинності на зниження рівнів шуму. Це проявляється у зменшенні інтенсивності звукових коливань під час проходження їх через лісові насадження, оскільки шумові потоки частково поглинаються фітомасою деревної рослинності (Bolshakov, 2006; Kucheryav, 2003). Навіть вузькі смугові насадження і однорядні посадки значною мірою понижують рівень акустичного навантаження, який спричиняється транспортними засобами. Лісова смуга із листяних деревних видів рослин завширшки 10 м із густим підліском зменшує рівень шуму на 5–6 дБА, завширшки 15 м – на 7–8 дБА, а смуга у 20 м – на 11–12 дБА. Шахові посадки ялини та модрина завширшки 20 м із піднаметовим ярусом спроможні зменшити рівень шуму до 14 дБА.

Порівняльний аналіз шумопоглинальних властивостей шпилькових і листяних деревних видів рослин показав, що шпилькові деревні види характеризуються меншою шумопоглинальною здатністю порівняно із листяними. При цьому найліпший шумозахисний екран має густе смугове захисне насадження із складним високоповотним змішаним деревостаном, де як головний використано шпильковий деревний вид. Необхідно зазначити, що різні деревні й кущові види рослин характеризуються і різними шумозахисними властивостями. Значний шумопоглинальний ефект притаманний видам із широкою листковою пластинкою – дубу, липі, клену, тополі, в'язу тощо (Osin, 1962).

Також спостерігається закономірність щодо більшого шумопоглинального ефекту лісових насаджень у літній період, порівняно із зимовим. У ці періоди 5–8-рядні лісові смуги понижують рівень шумового забруднення відповідно на 7–9 і 3–4 дБА (Tsvetkov, 2000).

Під час проектування захисних лінійних насаджень потрібно враховувати місцеві умови та нормативні акти, які регламентують безпечні для організму людини рівні шуму. Необхідно зважати на кліматичні умови, які безпосередньо можуть впливати на послаблення звукових хвиль, – зокрема температуру повітря, силу та напрями переважних вітрів. Урахування таких факторів під час проектування і розміщення придорожніх смуг уздовж шляхів автомобільного транспорту набуває особливого значення у санітарно-рекреаційних зонах та місцях масового проживання населення.

Загальновідомо, що акустичний ефект лінійних насаджень визначається їхнім розміщенням відносно джерела акустичного випромінювання. Найбільш раціональним є паралельне розташування лісових смуг. За такого розміщення по краях смугових насаджень проходить багаторазове відбиття та дифузне розсіювання звукових хвиль, що забезпечує зменшення сили шумів. Захисні лісові смуги також потрібно розміщувати від джерела шуму на відстані, яка чисельно дорівнює середній висоті насаджень. Розміщення смуг на більшій відстані може спонукати до «перегинання» звукових хвиль через смугове насадження.

За умов, які не передбачають можливості створення захисних смугових насаджень у зонах надмірної сили шуму, використовують шумозахисні екрани. Визначенням їхньої ефективності у світі почали займатися з середини 1960-х рр. В основу таких досліджень покладено роботу (Maekawa, 1968), однак автори останньої розглядали питання розміщення шумозахисних екранів без урахування впливу землі й не брали до уваги захисні смугові насадження. Пізніше було проведено лабораторні дослідження щодо ефективності шумозахисних екранів для точкових джерел звуку та отримано наближені вирази зі знаходження їхньої ефективності з урахуванням від-

биття звуку від поверхні землі (Jonasson, 1972). Ці дослідження базувалися на теорії геометричної акустики, що призвело до обмеження сфери застосування отриманих виразів у діапазоні низьких і середніх частот. У подальшому стало можливим проводити комп'ютерне моделювання акустичного поля довкола екрана. Найширше практичне застосування отримали метод граничних областей (Hewett, Langdon, & Chandler-Wilde, 2014) і метод кінцевих елементів (Francois, Schevenels, Degrande, Borgions, & Thyssen, 2008).

Мета дослідження полягала у визначенні кількісних характеристик шумопоглинальних властивостей придорожніх лісових смуг залежно від їхніх конструктивних особливостей та видового складу, що зростають уздовж автомобільних магістралей міжнародного та національного значення в умовах Західного Полісся. Для виконання порівняльної характеристики шумопоглинальних властивостей придорожніх лісових смуг із шумозахисними екранами було проведено визначення зниження рівня шуму в зоні дії таких екранів.

Матеріали і методи дослідження. Під час дослідження шумових характеристик у процесі руху автомобільного транспорту використовували метод натурних вимірів, який було адаптовано відповідно до поставлених завдань. Такий метод, який введений до низки стандартів, дає змогу виконувати дослідження на реальному транспортному потоці, встановлювати санітарно-гігієнічну оцінку шуму на відповідний період часу, визначати шумові характеристики транспортних потоків, а також рівні звуку від транспортного руху на сельбищних територіях.

Із метою виконання програмних завдань роботи частково використано методику досліджень шумопоглинального ефекту придорожніми лісовими смугами, яка містить визначення шумопроникнос-

ті лісових смуг і розсіювання звукових потоків від дії захисних лісових насаджень на прилегли до транспортних магістралей території (Pavlishyna, 2009). У подальшому результати вимірів підлягали обробленню та аналізу (Ugnenko, 2008; GBN В 2 3-37641918-556-2015).

Перед дослідженням акустичного забруднення було проведено вивчення лісівничо-меліоративних характеристик придорожніх лісових смуг. Такі характеристики було визначено на підставі закладки тимчасових пробних площ. У процесі виконання цих робіт було з'ясовано видовий склад смугових насаджень та їхні конструктивні особливості, ширину смуг за проекціями крон, відстань від смуги до полотна дороги тощо. Дослідні ділянки закладали поблизу населених пунктів.

Дослідження виконували в умовах сухої і безвітряної погоди під час найінтенсивнішого руху автомобільного транспорту, що в районі досліджень спостерігається з 11.00 до 15.30 год. Оскільки формування шумового навантаження визначається, насамперед, масою транспортних засобів і потужністю їхніх двигунів, то вимірювання рівнів шуму проводили для транспортних засобів масою понад 4 т. Середня швидкість руху транспорту при цьому була у межах від 80 до 100 км/год.

Рівні шуму вимірювали з використанням шумоміру SL-824, який попередньо пройшов державну метрологічну сертифікацію. Прилад встановлювали безпосередньо у зоні прямого поширення звукових хвиль на висоті 1,3 м від поверхні землі. Для проведення дослідів вибирали рівнинні ділянки території, оскільки нерівності рельєфу можуть впливати на зміну турбулентного режиму повітряних потоків, а відповідно і специфіку розсіювання звукових хвиль.

Заміри виконували з точністю до 1дБА у пунктах, які розташовувалися на одній прямій лінії (лінійному ряду), що

формувалася перпендикулярно до осі автомобільної дороги. Для забезпечення більш достовірних результатів досліджень на кожній придорожній лісовій смузі було визначено по п'ять лінійних рядів. Кожен такий ряд складався із чотирьох пунктів заміру: пункт № 1 – безпосередньо біля дорожнього полотна; пункт № 2 – на рівні проекції крон зі сторони дороги; пункт № 3 – у середині лісової смуги; пункт № 4 – за лісовою смугою (рис. 1).

Щоб з'ясувати шумопоглинальну дію екранів, було проведено заміри шуму у зоні їх впливу. За контрольну ділянку слугували заміри безпосередньо біля полотна дороги. Також вимірювання проводили у трьох пунктах: перед екраном на відстані 5 м від дороги та за екраном на відстані 5 м і 10 м. Дослідження проводили безпосередньо як у зоні дії шумозахисних екранів, так і без них на тих самих відстанях від полотна дороги. Для зручності виконання аналізу отриманих показників їх переводили у відсотки порівняно із контрольною ділянкою.

Отримані показники вимірювань обробляли за допомогою методу статистичного моделювання з використанням програмного забезпечення MS Excel. Результати виконаних досліджень представлені математичними моделями та у вигляді графічного матеріалу.

Результати дослідження та їх обговорення. Об'єктами досліджень, як зазначено вище, стали придорожні лісові смуги різного видового складу та конструкцій, що зростають уздовж автомобільних магістралей міжнародного та національного значення, а також шумозахисні екрани. В умовах Західного Полісся такі лінійні насадження виконують низку важливих захисних функцій: снігозатримувальні, вітропослаблювальні, ґрунтозакріплювальні, шумопоглинальні. Характеристику придорожніх лісових смуг, де були закладені дослідні ділянки, наведено в табл. 1.

Як видно із даних таблиці, такі насадження представлені переважно одним видом деревних рослин, зокрема березою повислою, кленом гостролистим, робінією псевдоакацією, сосною звичайною, вільхою клейкою, грабом звичайним, і сформовані із 2–4 рядів. Для дослідження акустичного ефекту було відібрано по три смуги різних конструкцій – продувної, ажурної та щільної. Конструкція, як відомо, визначається будовою поздовжнього вертикального профілю лісової смуги в листяному стані, що зумовлює її аеродинамічні властивості. Визначення конструкцій смугових насаджень проводили згідно з ДСТУ 4874:2007 «Агроріселіорація. Терміни і визначення понять».

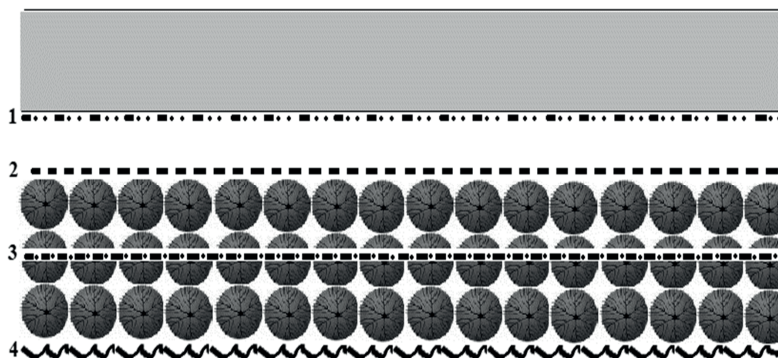


Рис. 1. Схема пунктів заміру шуму на пробних ділянках (1–4 – пункти заміру)

1. Характеристика придорожніх лісових смуг

№ з/п	Склад	Конструкція	Відстань від смуги до полотна дороги, м	Кількість рядів, шт.	Ширина смуги за проекцією крон, м	Місцезнаходження дослідної ділянки на дорожній мережі
1	10Клг	Продувна	11,2	2	12,4	М-06, 390 км
2	10Бп	Продувна	10,1	3	15,5	М-07, 403 км
3	10Влч	Продувна	11,4	2	12,6	М-07, 407 км
4	10Клг	Ажурна	10,6	2	15,5	М-06, 289 км
5	9Сз1Бп	Ажурна	11,7	3	15,3	М-19, 175 км
6	10Акб	Ажурна	10,3	2	10,8	Н-22, 76 км
7	10Гз	Щільна	10,8	3	15,2	М-06, 345 км
8	10Клг	Щільна	11,9	2	15,4	М-06, 346 км
9	10Клг	Щільна	11,0	4	20,3	М-19, 74 км

Відстань від смуг до полотна дороги становила від 10,1 до 11,9 м. Ширина смуг за проекцією крон – у межах 10,8–20,3 м, що залежить від величини самої ширини смуги (відстань між крайніми рядами з урахуванням ширини закрайок). Дослідження проводили на дорогах міжнародного (М 06 Київ – Чоп; М 07 Київ – Ковель – КПП «Ягодин»; М 19 Доманове (Волинська область) – Порубне (Чернівецька область)) та національ-

ного (Н 22 Устилуг – Луцьк – Рівне) значення.

Характеристика шуму на шляхах автомобільного транспорту залежить від організації руху, дорожніх умов, маси транспортних засобів та інтенсивності руху потоку автомобілів. Шум від автотранспорту генерується низкою складових: шум від зчеплення шин із дорожнім покриттям, аеродинамічний шум і шум від роботи двигунів.

2. Показники вимірювання рівня шуму, дБА

№ з/п	Склад	Біля полотна дороги	Перед смугою	Середина смуги	За смугою
Продувна конструкція					
1	10Клг	81±2,7	79±0,9	65±1,1	49±1,0
2	10Бп	80±1,8	82±1,2	62±1,0	55±2,0
3	10Влч	82±2,2	81±1,5	66±0,9	63±2,2
Середнє	-	80±0,8	81±1,2	64±1,7	57±5,7
Ажурна конструкція					
4	10Клг	82±1,0	80±2,0	66±0,9	62±2,5
5	9Сз1Бп	81±0,8	80±1,6	64±2,3	54±2,2
6	10Акб	81±1,3	81±1,4	66±2,0	63±1,9
Середнє	-	82±0,5	82±0,5	66±0,9	58±4,0
Щільна конструкція					
7	10Гз	82±0,6	83±0,7	65±1,0	52±2,2
8	10Клг	81±0,8	81±1,5	66±1,3	52±2,5
9	10Клг	80±1,2	78±1,8	67±0,8	57±2,1
Середнє	-	81±0,8	82±2,1	66±0,8	54±2,4
Ділянка дороги без насаджень*	-	82±0,8	81±0,5	76±1,0	69±2,0

*Заміри проводили на тій самій відстані від полотна дороги, що і з насадженнями.

3. Моделі шумопоглинання придорожніми лісовими смугами різних конструкцій

Конструкція	Модель	Показник достовірності апроксимації, R ²
Продувна	$y = -0,6098x^2 - 5,7317x + 107,93$	0,885
Ажурна	$y = -2,7778x^2 + 1,9136x + 102,16$	0,957
Щільна	$y = -4,2683x^2 + 8,1707x + 97,561$	0,956
Контроль	$y = -1,8293x^2 + 3,7805x + 98,171$	0,998

Показники акустичного навантаження на прилегли до автомобільних доріг території визначали за описаною вище методикою. За контроль слугувала незахищена смугами ділянка дороги, де заміри проводили на тій самій відстані від полотна, що і з насадженнями. Отримані результати замірів занесли до журналу польових матеріалів. Абсолютні показники рівня шуму від роботи автомобільного транспорту наведено в табл. 2.

Під час розрахунків максимальна допустима похибка середнього арифметичного становила $\pm 5,7$ дБА.

Моделювання залежностей між рівнем шуму та відстанню від джерела його генерації для придорожніх лісових смуг

різних конструкцій виконано з використанням програмного забезпечення MS Excel. При цьому для побудови математичної моделі було використано поліноміальне рівняння другого ступеня із наведенням коефіцієнта апроксимації у розрізі конструкцій (табл. 3).

Особливості зменшення шумового забруднення під впливом придорожніх лісових смуг різних конструкцій відображено на лінії тренду, які описують значення рівня шуму на основі натурних вимірів (рис. 2).

За наведеними на рис. 2 лініями тренду, які показують зниження рівня шуму на підставі математичного моделювання, можна зробити висновок про те, що конструктивні особливості придорожніх лі-

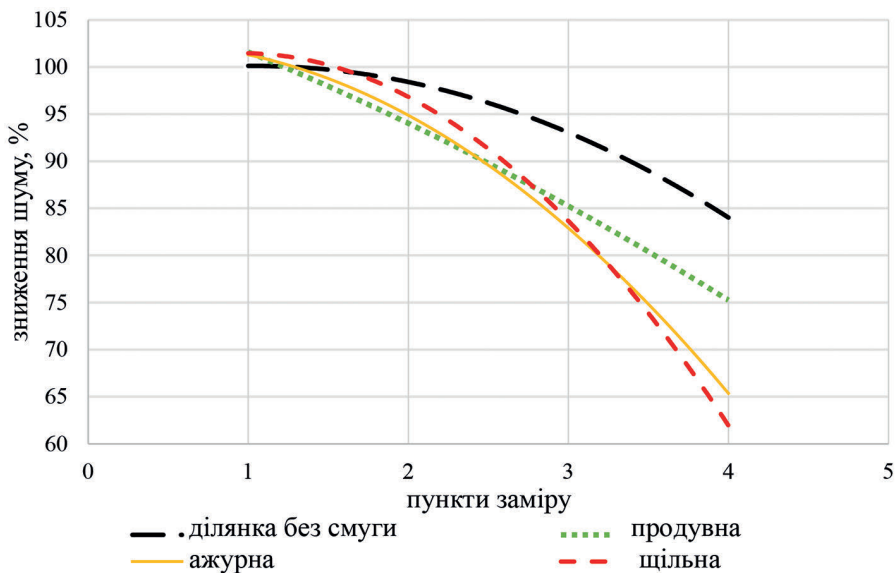


Рис. 2. Зниження рівня шуму на підставі математичного моделювання залежно від конструкції насаджень

сових смуг певною мірою впливають на зниження акустичного навантаження. На контрольній ділянці (без насаджень) рівень шуму на всіх пунктах заміру є найвищим, оскільки немає жодних перепон на шляху звукових хвиль. У розрізі конструкцій насаджень можна зауважити, що близькі шумопоглинальні властивості мають придорожні смуги ажурної та щільної конструкцій. Порівняно із контрольною ділянкою шумопоглинальна ефективність смуг саме таких конструкцій перебуває на рівні 20 %. Дещо меншим шумопоглинальним ефектом (на рівні 10 %) у пункті спостережень № 4 характеризуються смуги продувної конструкції.

У межах населених пунктів за браком придорожніх лісових смуг встановлюють шумозахисні екрани. Під час проектування та встановлення шумозахисних екранів уздовж шляхів інтенсивного руху автомобільного транспорту потрібно враховувати той факт, що відбита звукова хвиля не має повертатися до автомобілів. У придорожніх лісових смугах таке відбиття майже не спостерігається.

Шумозахисні екрани (акустичні екрани, шумозахисні бар'єри, акустичні бар'єри) – це перешкода на шляху поширення звукових хвиль. Шумозахисні екрани виготовляють з акрилу, монолітного полікарбонату, деяких видів композитних матеріалів. В умовах великих міст із таких матеріалів споруджують вертикальні стінки, які встановлюють уздовж автодоріг з інтенсивним рухом, залізничних колій, аеровокзалів і виробництв у випадку, якщо вони розташовані безпосередньо в житловій зоні (ISO 7235:2003).

Принцип роботи шумозахисних екранів полягає у тому, що вони формують зону акустичної тіні. Створення ефекту бар'єру для звукових хвиль може бути у тому випадку, коли вони у вертикальній проекції проходять

нижче цієї тіні. Тобто, якщо провести умовну лінію від джерела шуму до верхини екрана, то звукова хвиля не має до неї доходити (Farina, & Fausti, 1995). Досягти такого ефекту у штучних екранах доволі важко, а в захисних смугах такого недоліку немає. Придорожні лісові смуги не мають певні особливості шумозахисних екранів, проте значно ефективніше можуть розсіювати шум за рахунок своєї будови.

Шумозахисні екрани поділяють на шумопоглинальні та шумовідбивальні. Для шумопоглинальних екранів використовують спеціальні шумопоглинальні акустичні панелі з перфорацією. Такі панелі приймають на себе звукову хвилю, пропускають її всередину через отвори у фасадній стороні, де кінетична енергія звукової хвилі поглинається спеціальним акустичним матеріалом (багатошарове скло або перфорований металевий лист зі звукопоглинальною задньою стінкою). У результаті цього кінетична енергія звуку гаситься між двома шарами матеріалу.

Недоліки шумозахисних екранів полягають у такому: створюють відчуття обмеженості простору для водіїв; зменшують освітленість і обмежують огляд, спотворюють кольори і зображення; обмежують крокову доступність цієї ділянки траси (у разі необхідності надання негайної допомоги чи потреби негайного залишення ділянки). Ефективний захист від шуму спостерігається за висоти екранів не менше ніж 3–4 м, а запас по довжині має становити 5 м з обох сторін. На противагу шумозахисним бар'єрам придорожні лінійні насадження не мають зазначених недоліків і працюють у комплексному захисті шляхів автомобільного транспорту. Отримані показники щодо замірів рівня шуму в зоні дії шумозахисних екранів та без них наведено в табл. 4.

Згідно з отриманими показниками рівня шуму у зоні дії шумозахисних

4. Показники вимірювання рівня шуму в зоні дії шумозахисних екранів і без них

Місце виміру	Рівень шуму, дБА	% до контрольної ділянки
контроль		
біля полотна дороги	81±0,7	100
у зоні дії шумозахисних екранів		
перед екраном на відстані 5 м від дороги	75±0,8	93
за екраном на відстані 5 м	63±0,5	78
за екраном на відстані 10 м	60±1,0	74
без шумозахисних екранів		
на відстані 5 м від дороги	76±1,0	94
на відстані 10 м	72±1,2	89
на відстані 15 м	69±1,2	85

екранів прослідковується ефективне зменшення шумового навантаження для різних пунктів спостережень відповідно на 7,22 і 26 %. Без таких конструкцій на аналогічних відстанях від полотна дороги природне зниження рівня шуму становить 6, 11 і 15 %. Тобто на відстані 5 м від дороги на ділянках з екраном та без нього суттєвої різниці у зменшенні рівня шуму не спостерігається. На відстані 5–10 м за екраном рівень шуму на 11 % менший, порівняно із аналогічними пунктами заміру без такої конструкції.

Загалом можна констатувати, що безпосередньо за шумозахисними екранами у районі досліджень рівень шуму знижується до 60 дБА, а з відстанню цей показник, через природне послаблення звукових хвиль, ще зменшується. Завдяки цьому рівень шумового навантаження для населених пунктів згідно з ISO 7235:2003 лежить у межах норми.

Висновки і перспективи. За наведеними лініями тренду, які відображають зниження рівня шуму на основі математичного моделювання, можна зробити висновок, що конструктивні особливості придорожніх лісових смуг певною мірою впливають на зниження акустичного навантаження від роботи автомобільного транспорту на дорогах міжнародного і національного значення

в умовах Західного Полісся. Близькі шумопоглинальні властивості зауважено у придорожніх лісових смугах ажурної та щільної конструкції. Порівняно із контрольною ділянкою їхня шумопоглинальна ефективність перебуває на рівні 20 %. Шумопоглинальний ефект на рівні 10 % мають смуги продувної конструкції.

Поряд із шумопоглинальними властивостями придорожніх лісових смуг виконують комплекс важливих меліоративних функцій: протиерозійні, водорегулювальні, снігозатримувальні, екологічні, естетичні тощо. Цим вони не лише захищають шляхи автомобільного транспорту, а й поліпшують умови існування людини.

За браком придорожніх лісових смуг у межах населених пунктів встановлюють шумозахисні екрани. На відстані 5 м від полотна дороги на ділянках із шумозахисним екраном та без нього суттєвої різниці у зменшенні рівня шуму не виявлено. На відстані 5–10 м за екраном рівень шуму знижується на 11 %, порівняно із аналогічними пунктами заміру без такої конструкції. Шумозахисні екрани у районі досліджень сприяють зниженню рівня шуму до 60 дБА та менше, забезпечуючи виконання необхідних санітарних норм для населених пунктів.

Список літератури

- Bobin, E. V. (1964). *Combating noise and vibration in railway transport*. Moscow: Transport [in Russian].
- Bolshakov, N. M. (2006). *Recreational forest management*. Syktyvkar: SLI [in Russian].
- Directive, C. (1988). 89/106/EEC Council Directive 89/106. EEC of 21 December 1988 on the approximation of laws, regulations and administrative provisions of the Member States relating to construction products. Available at <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX:31989L0106>.
- Farina, A., & Fausti, P. (1995). *Motorway traffic noise reduction by means of barriers: a design example based on prediction models and experimental verification*. Available at <http://www.angelfarina.it/Public/Papers/074-ICA95.PDF>.
- Francois, S., Schevenels, M., Degrande, G., Borgions, J., & Thyssen, B. (2008). A 2.5 D finite element-boundary element model for vibration isolating screens. *Proceedings of ISMA2008 International Conference on Noise and Vibration Engineering*, 5, 2765–2776.
- GBN B 2 3-37641918-556-2015_Noise protection structures. Available at https://ukravtodor.gov.ua/4489/standarty_ta_normy/hbn_v_2_337641918_556_2015_avtomobilni_dorohy_sporudy_shumozakhysni_vymohy_do_proektuvannya.html [in Ukrainian].
- Hewett, D. P., Langdon, S., & Chandler-Wilde, S. N. (2014). A frequency-independent boundary element method for scattering by two-dimensional screens and apertures. *IMA Journal of Numerical Analysis*, 35 (4), 1698–1728. <http://doi.org/10.1093/imanum/dru043>
- Hladun, H. B., & Hladun, Yu. H. (2013). Protection of highways by forest plantations of linear type and their forecast volumes. *Scientific hanging UkrNDILGA*, 123, 103–113 [in Ukrainian].
- ISO 1996-1:2016. (2016). Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 1: Basic quantities and assessment procedures.
- ISO 7235:2003. (2003). Acoustics – Laboratory measurement procedures for ducted silencers and air-terminal units – Insertion loss, flow noise and total pressure loss.
- Jonasson, H. G. (1972). Sound reduction by barriers on the ground. *Journal of Sound and Vibration*, 22 (1), 113–126. [http://doi.org/10.1016/0022-460x\(72\)90849-8](http://doi.org/10.1016/0022-460x(72)90849-8).
- Kucheryavy, V. P. (2003). *Phytomelioration: textbook manual for students natural and technical special higher education lock*. Lviv: Svit [in Ukrainian].
- Maekawa, Z. (1968). Noise reduction by screens. *Applied Acoustics*, 1 (3), 157–173. [http://doi.org/10.1016/0003-682x\(68\)90020-0](http://doi.org/10.1016/0003-682x(68)90020-0)
- Manojkumar, N., Basha, K., & Srimuruganandam, B. (2019). Assessment, Prediction and Mapping of Noise Levels in Vellore City, India. *Noise Mapping*, 6 (1), 38–51. <http://doi.org/10.1515/noise-2019-0004>
- Osin, V. A. (1962). Influence of sound-absorbing and sound-insulating ability of green spaces to reduce city noise. *Urban improvement*, 115–123 [in Ukrainian].
- Pavlishyna, O. M. (2009). Protective forest plantations of the southwestern railway. *Scientific Bulletin of NULES of Ukraine*, 19 (15), 98–102 [in Ukrainian].
- Pavlishyna, O. M. (2011). Noise-absorbing efficiency of protective forest plantations of railways. *Scientific Bulletin of NULES of Ukraine*, 164(1), 202–210 [in Ukrainian].
- Sheludchenko, B. A., & Vasyk, L. S. (2010). Rationale for the panels of the forest protection stripes of the road network. *Ecological safety and balanced nature management*, 2, 35–41 [in Ukrainian].
- Tsvetkov, P. A. (2000). *Fundamentals of forest ecology*. Krasnoyarsk: SibSTU [in Russian].
- Ugnenko, E. B. (2008). *Methodology for the design of road reconstruction taking into account environmental indicators*. Kharkov: HNADU [in Ukrainian].
- Ugnenko, E. B., & Gavrish, V. S. (2015). Determination of acoustic pollution of roadside space and the main noise characteristics of traffic flow. *Motorway of Ukraine*, 6, 39–41. Available at http://nbuv.gov.ua/UJRN/au_2015_6_12 [in Ukrainian].

Maksimtsev, S. I., Dudarets, S. M. (2020). Noise-absorbing properties of road-wood forest strips of different structures in the conditions of Western Polisia. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 11 (3), 25–35. <https://doi.org/10.31548/forest2020.03.003>

In the modern conditions of society development the role of protective plantings is great importance. In particular, types of such plantations in the study are protective strips along the roads. At first

glance, it is difficult to trace the processes that take place in these lanes. However, by selecting the appropriate adapted research methodology, it is possible to trace these seemingly hidden functions.

The significance and relevance the use of roadside forest strips in the context of their noise-absorbing functions are presented. Attention is paid to the analysis of noise load for the operation of large vehicles on highways of international and national importance in the conditions of Western Polissya. An analysis of recent scientific publications with an emphasis on protective plantings as an effective means of preventing negative acoustic loads. The main purpose of the research was to determine the noise-absorbing properties of roadside forest belts depending on their design features and species composition. It is noted that the solution of program tasks of work is carried out with the use of special techniques of researches of noise-absorbing effect by protective forest plantations on transport ways. The comparative characteristic of noise-absorbing effect roadside forest strips and noise-protective screens are executed. On the basis of the conducted researches the mathematical models describing a decrease in noise level depending on a design of roadside forest strips are developed. The generalization of the experimental results showed that the roadside strips of dense and openwork structures are marked by the highest quality noise-absorbing effect. Noise protection screens in the study area help to reduce the noise level to 60 dB and less, it than ensure compliance with the necessary sanitary standards for settlements.

Keywords: *noise level, acoustic load, noise meter, mathematical model, noise protection screen.*

Отримано: 2020-08-15

ВПЛИВ НАНОЧАСТИНОК CeO_2 НА ПРОРОСТАННЯ НАСІННЯ ТА СИНТЕЗ ФЕНОЛІВ У ПРОРОСТКАХ ЯЛИНИ ЄВРОПЕЙСЬКОЇ

А. П. ПИНЧУК, кандидат сільськогосподарських наук, доцент
<https://orcid.org/0000-0003-1256-9838>, e-mail: a_pinchuk@nubip.edu.ua

А. Ф. ЛІХАНОВ, кандидат біологічних наук, доцент
<https://orcid.org/0000-0001-6580-7241>, e-mail: likhanov.bio@gmail.com

І. В. ІВАНЮК, кандидат сільськогосподарських наук, доцент
<https://orcid.org/0000-0002-1493-976X>, e-mail: i_ivanyuk@nubip.edu.ua
Національний університет біоресурсів і природокористування України

М. Я. СПІВАК, доктор біологічних наук, професор
<https://orcid.org/0000-0002-4394-7275>, e-mail: Spyvak@nas.gov.ua
Інститут мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України

Сучасні технології дають змогу отримувати наночастинки біогенних металів для їх використання як додаткового джерела мікроелементного живлення рослин. Складність масового застосування нанорозмірних частинок металів та їхніх оксидів зумовлено суттєвою різницею фізико-хімічних властивостей нанокристалічних структур залежно від технології отримання, розмірів наночастинок, поверхневого заряду (ζ-потенціалу), способів стабілізації. Від цього залежить біосумісність і характер дії наночастинок на живі організми.

Щодо ефективності й доцільності використання наночастинок діоксиду церію у практиці рослинництва немає однозначної думки. Зважаючи на актуальність проблеми підготовки садивного матеріалу сіянців хвойних рослин, недостатньою є вивченість впливу нанокристалічного діоксиду церію на рослини. Метою наших досліджень було вивчення впливу нанокристалічного золю діоксиду церію на процеси проростання насіння ялини європейської та оцінка його дії на синтез фенолів як компонентів антиоксидантної системи проростків.

При проведенні досліджень використано методи визначення енергії проростання та схожості насіння, методи визначення вмісту фенольних сполук, флавоноїдів і фенольних антиоксидантів.

Результати досліджень показали, що нанокристалічний діоксид церію у концентрації золю від 0,1 до 1,0 мг/мл стимулює процеси проростання насіння ялини європейської. Під впливом наночастинок за концентрації 0,1 мг/л у тканинах проростків ялини європейської збільшується вміст фенольних сполук. Підвищення антиоксидантної активності фенолів у тканинах проростків на тлі зменшення їхньої загальної кількості за концентрації нанокристалічного діоксиду церію від 0,5 до 1,0 мг/л, відбувається на тлі збільшення у загальному пулі частки флавоноїдів, які вирізняються високою антиоксидантною активністю.

Нанокристалічний діоксид церію є перспективним матеріалом для стимулювання енергії проростання та схожості насіння ялини європейської.

Ключові слова: наночастинки, ялина європейської, насіння, феноли, флавоноїди, антиоксиданти.

Актуальність та аналіз останніх досліджень. Сучасні технології дають змогу отримувати наночастинки біогенних

металів для їх використання як додаткового джерела мікроелементного живлення рослин (Talankova-Sereda, 2016;

Kalenska et al., 2012). Складність масового застосування нанорозмірних частинок металів та їхніх оксидів зумовлено суттєвою різницею фізико-хімічних властивостей нанокристалічних структур залежно від технології отримання, розмірів наночастинок, поверхневого заряду (ζ -потенціалу), способів стабілізації (Ivanov, Usatenko, & Shcherbakov, 2009) та рН розчину (Asati et al., 2009). Від цього залежить біосумісність і характер дії наночастинок на живі організми. Наночастинки кристалічного діоксиду церію (НДЦ) залежно від розміру та співвідношення іонів $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ на поверхні здатні виконувати функції різних ензимів (каталаз, оксидаз) (Shcherbakov et al., 2011). НДЦ за умов $\text{pH} < 6,0$ виконує оксидазні (Perez, Asati, Nath, & Kaittanis, 2008), а за $\text{pH} > 7,0$ – каталазні функції (Shcherbakov et al., 2011). Здатність НДЦ перехоплювати і знешкоджувати активні форми кисню (АФК) також залежить від показника рН (Perez, Asati, Nath, & Kaittanis, 2008).

Біологічна дія церію, як і інших лантаноїдів, також може відхилитися від звичайної монотонної залежності доза – відгук. Виявлено обернену залежність між швидкістю розчинення, біодоступністю – і розміром частинок НДЦ. Розчинення наночастинок НДЦ у різних субстратах – процес доволі повільний (Cornelis et al., 2011; Röhder, Brandt, Sigg, & Behra, 2014). Є повідомлення, що наночастинки НДЦ розміром понад 20 нм взагалі не транспортуються через корені в надземні органи рослин (Schwabe et al., 2013). Окрім того, надходження НДЦ у корені залежить від наявності у ґрунті або живильному середовищі органічних речовин (Trujillo-Reyes et al., 2013; Zhao et al., 2012). Вважають, що НДЦ взаємодіє із сіркою з утворенням сульфату церію, що також впливає на біодоступність цих елементів (Xu, He, & Yu, 2009). Також варто враховувати здатність НДЦ до авторегене-

рації та біотрансформації. Проте нині повідомлення щодо біотрансформації наночерію є достатньо суперечливими.

Щодо ефективності й доцільності використання наночастинок діоксиду церію у практиці рослинництва немає однозначної думки. Біологічна активність церію багато в чому визначається близькістю іонних радіусів Ce^{3+} і Ca^{2+} . Це дає змогу іонам церію частково заміщати іони кальцію у складі біомолекул. Разом з тим, біологічна дія церію може відхилитися від звичайної монотонної залежності доза – відгук. Показано, що CeO_2 значно пригнічує проростання насіння *Lactuca sativa*, *Cucumis sativus*, *Solanum lycopersicum*, *Spinacia oleracea* (Garcia et al., 2011). Також є відомості, що наночастинки pCeO_2 сповільнюють проростання насіння *Raphanus sativus* L., але при цьому не впливають на показники їхньої схожості. У польових умовах у рослин після оброблення pCeO_2 виявляли в коренеплодах, що вказує на їхню рухливість у тканинах рослин (Corral-Diaz et al., 2014). Застосування наночерію (розмір частинок 8 нм) у діапазоні концентрацій 0–400 мг/кг суттєво не вплинуло на біомасу та врожайність рослин пшениці. Транслокацію іонів церію від коренів до плодів показано на томатах (Wang, Ebbs, Chenc, & Ma, 2013). У експерименті з проростками *Cucumis sativus* L. частинки розміром 7 нм після входження у провідну зону кореня переносилися далі в усі вегетативні частини пагонів. Водночас екзогенне застосування наночерію достовірного впливу на проростання насіння в салаті спаржевий не показало. На думку Zhang зі співавторами (Zhang et al., 2011), інтенсивність латерального переносу насамперед залежить від розмірів частинок. Проте питання механізму транспортування наночастинок через тканинні бар'єри коренів залишається відкритим.

Зважаючи на актуальність проблеми підготовки садивного матеріалу сянців

хвойних рослин (Melnychuk et al., 2013), недостатньою є вивченість впливу нанокристалічного діоксиду церію (НДЦ) на рослини.

Метою досліджень було дослідження впливу нанокристалічного золю діоксиду церію на процеси проростання насіння ялини звичайної і оцінка його дії на синтез фенолів як компонентів антиоксидантної системи проростків.

Матеріали і методи дослідження. В експерименті використовували насіння *Picea abies*. Для оброблення насіння використовували 0,1 М золь нанодисперсних частинок діоксиду церію. Від базового золю відбирали 0,1, 0,5, 1,0 і 1,5 мл розчину і розводили в 1 л дистильованої води. Намочування насіння проводили кілька секунд. Контрольну партію насіння замочували в дистильованій воді. Після замочування насіння відразу перенесли на спеціалізований апарат для пророщування насіння. Визначення показників енергії проростання і схожості здійснювали відповідно до державного стандарту України (SSU, 2015).

Сумарну концентрацію фенольних сполук визначали в метанольних екстрактах (v/v – 1/10) проростків із використанням реактиву Фолина–Ческольтеу. Калібрувальний графік будували по галовій кислоті (Sibgatullina et al., 2011).

Кількісний вміст флавоноїдів визначали спектрофотометрично за $\lambda = 419$ нм. Для цього до 300 мкл метанольного екстракту послідовно додавали 200 мкл 0,1 М розчину хлориду алюмінію ($AlCl_3$) і 300 мкл 1М ацетату натрію (CH_3COONa). Як стандарт для побудови калібрувального графіка використовували кверцетин (Sigma, Germany).

Визначення фенольних антиоксидантів (АОА) виконували методом, який базується на використанні вільного стабільного радикала 2,2-дифеніл-1-пікрілгідрозіла (ДФПГ). Як стандарт для побудови калібрувального графіка використовували водорозчинний вітамін Е

(Trolox). Для приготування стокового розчину 6 мг вітаміну (MTrolox = 250,29) розчиняли в 2,4 мл 80 % етанолу. Реакційна суміш містила 0,25 мл рослинного екстракту, 1,75 мл 80 % етанолу, 2 мл 0,2 мМ розчину ДФПГ. У контрольні пробірки замість фенольного екстракту додавали 80 % етанол. Реакція починалася після додавання розчину ДФПГ. Пробірки струшували і залишали на 30 хв у темряві за температури 25 °С. Оптичну густину реакційної суміші визначали за довжини хвилі 517 нм. Антиоксидантну активність екстрактів висловлювали в мкМ-екв Trolox (Sibgatullina et al., 2011).

Статистичне оброблення даних виконували за допомогою спеціалізованої програми Statistica 7.0. Регресійний аналіз і математичне моделювання динаміки вмісту фенольних сполук і антиоксидантної активності здійснювали за допомогою програми Sigma Plot 12.0.

Результати дослідження та їх обговорення. Після замочування насіння *Picea abies* у водному розчині наночастинок діоксиду церію показники енергії проростання і схожості поступово зростали в діапазоні концентрації нанопрепарату від 0,1 до 1,0 мг/л. Регресійний аналіз виявив ступеневу залежність між концентрацією НДЦ, енергією проростання ($R^2 = 0,9779$) і схожістю ($R^2 = 0,9778$), яка описувалася логнормальною функцією:

$$y = y_0 + \frac{a}{x} \exp \left[-0.5 \left(\frac{\ln(x/x_0)}{b} \right)^2 \right]. \quad (1)$$

Коефіцієнти в рівнянні мають певне фізіологічне пояснення: y_0 – базова енергія проростання або загальна схожість насіння *Picea abies* певного рівня якості; a , b – емпіричні коефіцієнти, з яких перший визначає енергетичний потенціал насіння, другий – характеризує динаміку зміни швидкості проростання насіння за дією НДЦ (певною мірою цей коефіцієнт визначає чутливість біологічної системи); x_0 ($x_0 \neq 0$) – концентрація НДЦ, за

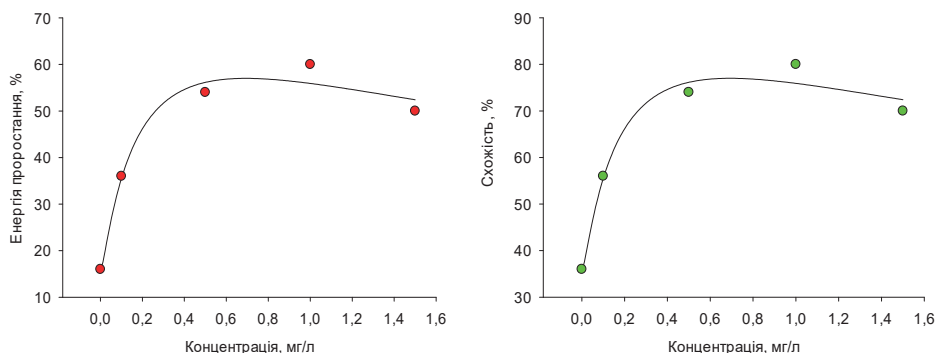


Рис. 1. Вплив НДЦ на показники енергії проростання і схожості насіння *Picea abies*

якою показники проростання насіння виявляють максимальний фізіологічний ефект на екзогенний стимул; x – концентрація діючого агента (НДЦ).

Точність апроксимації емпіричних даних ($R^2 \sim 0,9779$) логнормальною функцією є достатньою для його використання як математичної моделі прогнозування впливу НДЦ на фізіологічний стан проростків ялини звичайної в межах певної концентрації (0,1–1,5 мг/л) наночастинок (рис. 1).

Експериментально показано, що НДЦ стимулює проростання насіння ялини звичайної за концентрації в інтервалі від 0,1 до 1,0 мг/л. Найкраща емпірично визначена схожість насіння була за концентрації НДЦ – 1,0 мг/л. Утім математично обрхованою оптимальна концентрація була дещо нижчою – 0,8 мг/л. За умов збільшення концентрації НДЦ до 1,5 мг/л показники активності проростання насіння знижувалися.

Процеси проростання насіння супроводжуються активізацією окисно-відновних процесів, активізацією відповідних ферментних систем і синтезом біологічно активних сполук, зокрема вільних радикалів, АФК, що за високої концентрації є надзвичайно токсичними для рослинного організму. Для нейтралізації негативної дії радикалів, АФК, успішної адаптації проростків і забезпечення їхньої стійкості в рослинному організмі утворюються продукти вторинного синтезу з антиоксидантними властивостями, до яких належать фенольні сполуки.

Дослідження впливу наночастинок на вміст фенолів у тканинах проростків ялини звичайної показало, що НДЦ за концентрації 0,1 мг/л стимулює їхній синтез. Подальше збільшення концентрації наночастинок зумовлює незначне, але достовірне зменшення кількості фенольних сполук і фенольних антиоксидантів (АОА) (таблиця).

Фізіолого-біохімічні показники насіння і проростків *Picea abies* після оброблення препаратом НДЦ

Концентрація, мг/мл	Фн	Фл	АОА	Еп, %	Сх, %
0	57,1 ± 2,76	3,3 ± 0,17	84,5 ± 4,23	16,5 ± 0,90	36,2 ± 1,88
0,1	62,9 ± 3,15	4,4 ± 0,21	81,8 ± 5,09	36,2 ± 1,62	56,1 ± 2,34
0,5	58,1 ± 2,81	3,7 ± 0,23	77,8 ± 3,89	54,3 ± 2,74	74,4 ± 4,05
1,0	59,9 ± 3,05	6,2 ± 0,40	80,3 ± 4,02	60,2 ± 4,12	80,5 ± 3,65
1,5	55,0 ± 3,15	1,0 ± 0,08	73,9 ± 3,70	50,4 ± 2,38	70,3 ± 2,97

* Примітка: Фн – феноли, мг/г; Фл – флавоноїди, мг/г; АОА – антиоксиданти, мг/г; Еп – енергія проростання, %; Сх – схожість, %

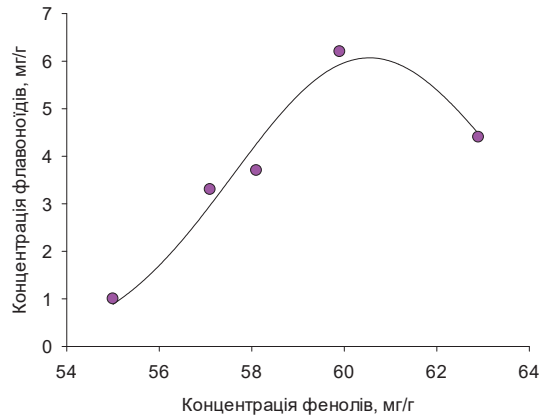


Рис. 2. Залежність співвідношення загальних фенолів і кількості флавоноїдів у тканинах проростків ялини звичайної за умов збільшення концентрації НДЦ

Варто зазначити, що, на відміну від показників схожості, кількість загальних фенолів і флавоноїдів у тканинах проростків ялини європейської за дії НДЦ у дослідженому діапазоні концентрацій змінювалась немонотонно, що ми також показали раніше на проростках сосни звичайної (Pinchuk et al., 2017). Помітне пригнічення фенольного синтезу спостерігалось за концентрації наночастинок у золі понад 1,5 мг/л. Підвищення АОА у тканинах проростків на тлі загального зменшення кількості фенолів за концентрації НДЦ від 0,5 до 1,0 мг/л, на нашу думку, пов'язано з підвищенням у загальному пулі фенолів частки флавоноїдів, які вирізняються високою антиоксидантною активністю (рис. 2).

Той факт, що немає монотонності функції, яка описує активність фенольного синтезу за підвищення концентрації наночастинок, свідчить про складний характер їхнього впливу на клітини і тканини проростків. Такий ефект визначено за концентрації золю НДЦ від 0,5 до 1,0 мг/л. Питання щодо механізму впливу НДЦ на рослинний організм залишається відкритим.

Через вплив НДЦ на синтез фенолів загалом змінюється функціонування ан-

тиоксидантної систему проростків ялини звичайної. Фенольні сполуки є акцепторами вільних радикалів, кількість яких зростає за умов інтенсивного дихання, і захищають клітинні компоненти від руйнування. Феноли у рослинному організмі утворюються переважно шикікатним шляхом (Zaprometov, 1993). У вищих рослин гени шикікатного шляху локалізовані в ядерному ДНК і містять N-термінальні сигнальні послідовності поліпептидів, необхідних для їх подальшого транспорту в пластиди. У хлоропластах, де відбувається утворення фенолів, транспортні пептиди відщеплюються спеціальними протеїназами. Ключовий етап фенілпропанідного синтезу у вищих рослин залежить від активності фенілаланін-аміакліази. Цей фермент бере участь в дезамінуванні L-фенілаланіну з утворенням транс-коричної кислоти. Для повноцінного функціонування ферментної системи шикікатного шляху як кофактори потрібні іони двовалентних металів, зокрема Mg^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ca^{2+} . Останній може частково замінюватися іонами церію і через це суттєво впливати на синтез фенольних речовин і на вторинний метаболізм у цілому.

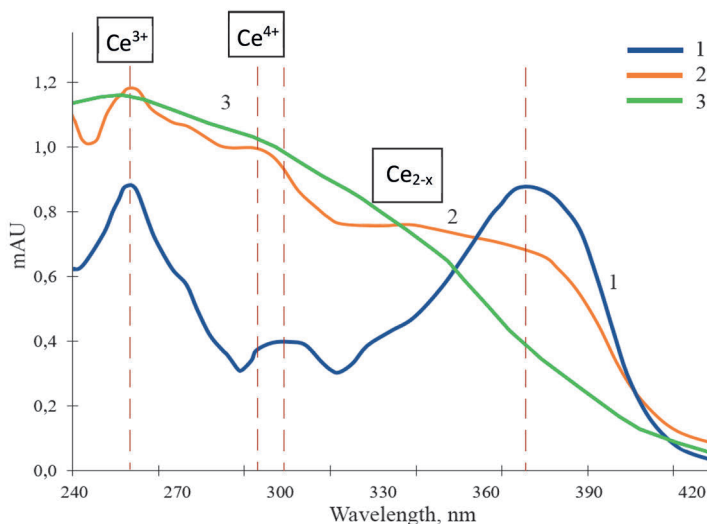


Рис. 3. УФ-спектри поглинання кверцетину після його взаємодії з поверхнями наночастинок діоксиду церію: 1 – УФ-спектр кверцетину; 2 – УФ-спектр кверцетину після взаємодії з наночастинками НДЦ; 3 – УФ-спектр золю НДЦ

Значна кількість флавоноїдів насамперед у мезофілі сім'ядолей проростків ялини зумовлена наявністю пластид та їх функціональною активністю. Наночастинки НДЦ сприяють синтезу флавоноїдів у проростках ялини за концентрації 1,0 мг/л. Саме за цієї концентрації виявляються найкращі показники енергії проростання і схожості насіння. У тканинах ялини флавоноїдний комплекс представлений глікозидами кемпферолу і кверцетину, а виявлено ларіцитрін, ізорманетин, мірицетин, а також сірінгетин 3-О-(6"-ацетіл)- β -глюкопіранозид (Slimestad et al., 1995).

За наявності металів зі змінною валентністю флавоноїди за підвищеної концентрації супероксид-аніон-радикалів у внутрішньоклітинному середовищі здатні виявляти супероксиддисмутазну активність (Heckert, Karakoti, Seal, & Self, 2008). У результаті окисно-відновних реакцій, за участю іонів металів, утворюються хелати і перекис водню. З огляду на те, що у тканинах проростків ялини звичайної накопичуються кверце-

тин і його глікозильовані форми, імовірним сайтом зв'язування з іонами церію є катехольна група гідроксилів. Висока реакційна здатність 3', 4'-гідроксилів В-кільця кверцетину щодо поверхні нанодисперсних частинок підтверджується зміною його УФ-спектра. Для кверцетину характерні два максимуми поглинання в метанолі: за 370 нм (пік I) і за 255 нм (пік II). Пік I зумовлений електронними переходами В-кільця, а пік II – А-кільця. За наявності нанодисперсних частинок діоксиду церію у флавоноїду спектр поглинання змінювався: спостерігалось зменшення інтенсивності абсорбції УФ із гіпсохромним зсувом максимуму піка I; довжина хвилі піка II не змінювалася, однак на спектрограмі дещо збільшувалась його висота (рис. 3).

Відомо, що наночастинки діоксиду церію за тривалого контакту з водою поступово змінюють значення ζ -потенціалу за рахунок заміни сорбованих на їхній поверхні протонів на ОН-групи (Vincent, Inerbaev, & Babu, 2010). За умови високого вмісту гідроксильних груп на по-

верхні наночастинок полегшується процес депротоїнізації катехольних гідроксилів флавонолів і, як наслідок, утворення його комплексів з іонами металів (зокрема церію), що впливає на антиоксидантні властивості поліфенолів (Valgimigli, Ingold, & Luszytk, 1996). При цьому змінюється активність вільних 3,5,7-гідроксильних і 4-карбонильних груп А і С кілець флавоноїдів, а також ліпофільність флавоноїдів і хелатованих поверхонь наночастинок. Наприклад, хелатування церію (IV) підвищує антирадикальну здатність флавоноїдів (Jabbari, & Gharib, 2012). Вважають, що міжмолекулярні водневі зв'язки фенольних гідроксильних груп з акцептором водневих зв'язків розчинника знижують їхню антиоксидантну активність (Valgimigli, Ingold, & Luszytk, 1996). Зокрема, за $\text{pH} < 6$ частинки НДЦ прискорюють розкладання поліфенолів незалежно від наявності АФК (Shcherbakov et al., 2011).

НДЦ після поглинання корінням рослин проникає у тканини, де може взаємодіяти з ендометаболітами. Наприклад, результати рентгенівської електронної мікроскопії показали, що наночастинок НДЦ розміром 6–9 нм перетворюються у коренях огірка на фосфат церію, а в пагонах – на карбоксилати церію (Zhang et al., 2011). Окрім того, є повідомлення про утворення у тканинах кореня пергідроксиду церію. Підтверджено транслокацію іонів Се тканинами ксилеми коренів (Rico et al., 2013). Показано, що катіони Се накопичуються у коренях і провідних тканинах рослин після оброблення наночастинами церію, водночас транслокацію Се вище у тканинах пагонів не підтверджено (Majumdar et al., 2014). Токсичність максимальних концентрацій НДЦ у

експерименті частково зменшують клітинні стінки перисперму насіння ялини європейської, які представлені первинними і вторинними оболонками. Ці клітинні компоненти створюють тканинний бар'єр, який перешкоджає вільному переміщенню НДЦ, його проникненню у клітини, накопиченню у протопластах клітин зародка і ендосперму.

Висновки і перспективи. Нанокристалічний діоксид церію, після намочування насіння ялини європейської, у концентрації золю від 0,1 до 1,0 мг/мл стимулює процеси його проростання. Залежність ефекту підвищення енергії проростання і схожості насіння від концентрації золю (0,1 – 1,5 мг/мл) описується логнормальною функцією.

За концентрації золю нанокристалічного діоксиду церію понад 1,5 мг/л у тканинах проростків ялини європейської відбувається пригнічення показників схожості насіння і синтезу фенольних сполук.

Вміст фенольних сполук у тканинах проростків після оброблення насіння у золі НДЦ за відповідними концентраціями змінюється немонотонно, що вказує на складний і, можливо, ступінчастий характер проникнення наночастинок у тканини і клітини рослинного організму.

Підвищення АОА у тканинах проростків на тлі загального зменшення кількості фенолів за концентрації НДЦ від 0,5 до 1,0 мг/л відбувається на тлі збільшення у загальному пулі фенолів частки флавоноїдів, які вирізняються високою антиоксидантною активністю.

НДЦ є перспективним препаратом для підвищення енергії проростання та схожості насіння ялини звичайної за концентрації 1,0 мг/мл.

Список літератури

Asati, A., et al. (2009). Oxidase-Like Activity of Polymer-Coated Cerium Oxide Nanoparticles. *Angewandte Chemie*, 121 (13), 2344–2348. <https://doi.org/10.1002/ange.200805279>

Cornelis, G., et al. (2011). Solubility and batch retention of CeO_2 nanoparticles in soils. *Environmental Science & Technology*, 45, 2777–2782.

- Corral-Diaz, B., et al. (2014). Cerium oxide nanoparticles alter the antioxidant capacity but do not impact tuber ionome in *Raphanus sativus* (L.). *Plant Physiol. Biochem.*, 84, 277–285.
- Garcia, A., et al. (2011). Acute toxicity of cerium oxide, titanium oxide and iron oxide nanoparticles using standardized tests. *Desalination*, 269, 136–141.
- Heckert, E. G., Karakoti, A. S., Seal, S., & Self, W. T. (2008). The role of cerium redox state in the SOD mimetic activity of nanoceria. *Biomaterials*, 29 (18), 2705–2709.
- Ivanov, V. K., Usatenko, A. V., & Shcherbakov, A. B. (2009). Antioxidant activity of nanocrystalline ceria to anthocyanins. *Journal of Inorganic Chemistry*, 54 (10), 1522–1527 [in Russian].
- Jabbari, M., & Gharib, F. (2012). Solvent dependence on antioxidant activity of some water-insoluble flavonoids and their cerium (IV) complexes. *Journal of Molecular Liquids*, 168, 36–41. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2012.02.001>
- Kalenska, S. M., et al. (2012). *Scientific substantiation of the use of nanosized biogenic metals in the system of fertilizers for field crops: scientific and practical recommendations*. Kyiv [in Ukrainian].
- Likhanov, A. F., Sereda, O. V., Klyachenko, O. L., Melnychuk, M. D. (2018). Influence of oxycoric and oxybenzoic acids on synthesis of plastid pigments and fenolic compounds in the leaves of common grape vine (*Vitis vinifera*) in vitro. *Plant physiology and genetics*, 50 (4), 331–343 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/frg2018.04.331>
- Majumdar, S., et al. (2014). Exposure of cerium oxide nanoparticles to kidney bean shows disturbance in the plant defense mechanisms. *J. Hazard. Mater*, 278, 279–287.
- Melnichuk, M. D., et al. (2013). Impact of pre-paring plant materials on the adaptative potential of scots *Pinus sylvestris* L. *Biological Resources and Nature Management*, 5 (5–6), 92–98 [in Ukrainian].
- Perez, J. M., Asati, A., Nath, S., & Kaitanis, A. (2008). Synthesis of biocompatible dextran coated nanoceria with pH dependent antioxidant properties. *Small*, 4, 552–556.
- Pinchuk, A. P., et al. (2017). The influence of cerium dioxide nanoparticles on germination of seeds and plastic exchange of pine seedlings (*Pinus sylvestris* L.). *Biotechnologia Acta*, 10 (5), 63–71 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/biotech.10.05.063>.
- Rico, C. M., et al. (2013). Effect of cerium oxide nanoparticles on rice: a study involving the antioxidant defense system and in vivo fluorescence imaging. *Environ. Sci. Technol.*, 47, 5635–5642. <https://doi.org/10.1039/C3MT00033H>
- Röhder, L. A., Brandt, T., Sigg, L., & Behra, R. (2014). Influence of agglomeration of cerium oxide nanoparticles and speciation of cerium (III) on short term effects to the green algae *Chlamydomonas reinhardtii*. *Aquatic Toxicology*, 152, 121–130.
- Schwabe, F., et al. (2013). Influence of two types of organic matter on interaction of CeO₂ nanoparticles with plants in hydroponic culture. *Chemosphere*, 91, 512–520.
- Shcherbakov, A. B., et al. (2011). Nanomaterials based on the nanocrystalline ceria: properties and use perspectives in biology and medicine. *Biotechnology*, 4 (1), 9–28 [in Ukrainian].
- Sibgatullina, G. V., et al. (2011). *Methods for determining the redox status of cultured plant cells*. Kazan: Kazan Federal University [in Russian].
- Slimestad, R., et al. (1995). Syringetin 3-O-(6'-acetyl)-β-glucopyranoside and other flavonols from needles of norway spruce, *Picea abies*. *Phytochemistry*, 40 (5), 1537–1542. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(95\)00383-i](https://doi.org/10.1016/0031-9422(95)00383-i)
- SSU 8558:2015 (2015). Seeds of trees and shrubs. Methods for seed testing (germination, viability, benign). Kyiv [in Ukrainian].
- Talankova-Sereda, T. Ye. (2016). The influence of silicon nanoparticles on *Mentha piperita* rhizogenesis under in vitro conditions. *Taurida Scientific Herald*, 96, 112–119 [in Ukrainian].
- Trujillo-Reyes, J., et al. (2013). Citric acid modifies surface properties of commercial CeO₂ nanoparticles reducing their toxicity and cerium uptake in radish (*Raphanus sativus*) seedlings. *Journal of Hazardous Materials*, 263, 677–684.
- Valgimigli, L., Ingold, K. U., & Luszyk, J. (1996). Antioxidant Activities of Vitamin E Analogues in Water and a Kamlet-Taft β-Value for Water. *Journal of the American Chemical Society*, 118 (15), 3545–3549. <https://doi.org/10.1021/ja954030r>
- Vincent, A., Inerbaev, T. M., & Babu, S. (2010). Tuning Hydrated Nanoceria Surfaces: Experimental/Theoretical Investigations of Ion Exchange and Implications in Organic and Inorganic Interactions. *Langmuir*, 26, 7188–7198. <https://doi.org/10.1021/la904285g>
- Wang, Q., Ebbs, S. D., Chenc, Y., & Ma, X. (2013). Transgenerational impact of cerium oxide nanoparticles on tomato plants. *Metallomics*, 5, 753–759. <https://doi.org/10.1039/C3MT00033H>
- Wang, Q., et al. (2012). The impact of cerium oxide nanoparticles on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and its implications for food safety. *Metallomics*, 4, 1105–1112. <https://doi.org/10.1039/C2MT20149F>
- Xu, W., He, H., & Yu, Y., (2009). Deactivation of a Ce/TiO₂ catalyst by SO₂ in the selective

- catalytic reduction of NO by NH₃. *The Journal of Physical Chemistry*, 113, 4426–4432.
- Zaprometov, M. N. (1993). *Phenolic compounds. Distribution, metabolism and function in plants*. Moskva: Nauka [in Russian].
- Zhang Z., et al. (2011). Uptake and distribution of ceria nanoparticles in cucumber plants. *Metallomics*, 3 (8), 816–822. <https://doi.org/10.1039/C1MT00049G>.
- Zhao, L., et al. (2012). Effect of surface coating and organic matter on the uptake of CeO₂ NPs by corn plants grown in soil: Insight into the uptake mechanism. *Journal of Hazardous Materials*, 225, 131–138.
-

Pinchuk, A. P., Likhanov, A. F., Ivanyuk, I. V., Spivak, M. Ya. (2020). Influence of CeO₂ nanoparticles on seed germination and synthesis of phenols in spruce seedlings. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 11 (3), 36–44. <https://doi.org/10.31548/forest2020.03.004>

Modern technologies make it possible to obtain nanoparticles of biogenic metals for use as an additional source of micronutrient for plants. However, the complexity of mass application of nanosized metal particles and their oxides is due to the significant differences in physicochemical properties of nanocrystalline structures which are dependent on production technology, nanoparticle size, surface charge (ζ -potential), and stabilization methods. The biocompatibility and nature of nanoparticles has an impact on living organisms.

Regarding the effectiveness and feasibility of using cerium dioxide nanoparticles in crop practice, there is no definitive conclusion. Due to difficulty in the preparation of planting material for seedlings of conifers, the study of the effect of nanocrystalline cerium dioxide on plants is not well researched. The aim of our research was to study the effect of nanocrystalline cerium dioxide solution on the germination of spruce seeds and then to evaluate its effect on the synthesis of phenols as components of the antioxidant system within seedlings.

The research used methods for determining the germination energy and seed similarities. Other methods used in this research were determining the content of phenolic compounds, flavonoids, and phenolic antioxidants.

The results showed that nanocrystalline cerium dioxide in a concentration of solution from 0.1 to 1.0 mg/mL stimulates the germination of spruce seeds. Under the influence of nanoparticles at a concentration of 0.1 mg/L in the tissues of spruce seedlings increases the content of phenolic compounds. The increase in antioxidant activity of phenols in seedling tissues while decreasing their total amount at a concentration of nanocrystalline cerium dioxide from 0.5 to 1.0 mg/L occurs when increasing the total pool of flavonoids, which are determined by high antioxidant activity.

Nanocrystalline cerium dioxide is a promising material for stimulating germination energy and on the overall germination of spruce seeds.

Keywords: nanoparticles, spruce, seeds, phenols, flavonoids, antioxidants.

Отримано: 2020-09-20

ВПЛИВ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ НА ОСЛАБЛЕННЯ В'ЯЗОВИХ ДЕРЕВОСТАНІВ ЗА УМОВ РОЗВИТКУ КОМАХ-КСИЛОФАГІВ

Н. В. ПУЗРИНА, кандидат сільськогосподарських наук, доцент
<https://orcid.org/0000-0003-1645-7489>, e-mail: npuzrina@nubip.edu.ua
Національний університет біоресурсів і природокористування України

М. І. ЯВНИЙ, кандидат сільськогосподарських наук
e-mail: iavniy@ukr.net

Комунальне підприємство «Дарницьке лісопаркове господарство»

Біологічна стійкість видів роду *Ulmus L.* взаємопов'язана з різними біотичними, абіотичними та антропічними чинниками, зокрема різними змінами відротермічного режиму, порушенням правил ведення рубок догляду у насадженнях за участю цих видів, пошкодженням листогазичними та стовбуровими шкідниками, які переносять і поширюють інфекцію, збудниками інфекційних хвороб, агентами невстановленої етіології тощо.

Крім цього, нерівномірний розподіл опадів за роками індукував погіршення санітарного стану в'язових деревних рослин, що спричинило їхнє ураження збудниками грибною та бактеріальною етіології і заселення комахами-ксилофагами. На підставі аналізу змін показників популяції за фазами розвитку осередків стовбурових шкідників показано, що досліджувані осередки стовбурових шкідників у динаміці за період з 2004 по 2006 р. перебували у стані розсіювання, або так званої кризи. Проте, починаючи з 2007 р., вони трансформувалися у стан власне спалаху осередку. Виявлені осередки стовбурових шкідників характеризуються високим, середнім і низьким ступенем заселення дерев. Водночас зафіксовано, що хронічним осередкам притаманні тривалий період існування, певною мірою невисокий, хоча й підвищений (порівняно із здоровими насадженнями), рівень чисельності комах і розмір поточного відпаду; для епізодичних осередків, або осередків масового розмноження – децю коротший (3–5 років) період розвитку, високий рівень чисельності й розмір поточного відпаду деревних рослин. Виявлено також, що в обох випадках можливі зворотні та незворотні реакції деревостанів, хоча за другого сценарію розвитку популяції шкідників, у разі їхнього масового розмноження, найчастіше відбувається повне руйнування лісового насадження. Зафіксовано, що поблизу осередків масового розмноження, які характеризуються надмірною щільністю популяції, зазвичай виникають міграційні осередки, куди розселяються шкодочинні комахи у пошуках нових місцеселень.

Ключові слова: популяція, осередки розмноження, стовбурові шкідники, максимум чисельності, популяційні показники.

Актуальність. Проблема погіршення санітарного стану широколистяних лісів України, а отже і насаджень за участі в'язових, зумовлює необхідність проведення наукового пошуку першопричин цього явища, чинників, які його спричиняють, і можливих негативних наслідків для лісового біоценозу (Debrunyuuk, & Skolsky, 2012). Зрозуміло, що одним із

визначальних факторів патологічного стану в'язових є метеорологічний, оскільки зміни температурного та водного режимів середовища зумовлюють відповідну реакцію на ці зміни як насаджень, так і окремих деревних рослин.

Клімат України формується під впливом глобальних змін, які прослідковуються на континенті, починаючи з другої

половин ХХ ст. Такі зміни призводять до поступового потепління, коли помітно зростає середньомісячна температура зимових та літніх місяців. Зміна температурного режиму і режиму зволоження в Євroatлантичному регіоні спричиняє зростання кількості стихійних явищ, пов'язаних зі змінами атмосферної циркуляції, які відтепер і у подальшому впливатимуть на лісові екосистеми (Buksha et al., 1998; Didukh, 2009; Polissya climate, 2018; Shvidenko et al., 2014; Shvidenko et al., 2017). Згідно з результатами моделювання за умови подвоєння вмісту CO₂ в атмосфері прогнозується підвищення температури повітря в усі сезони року, за всіма сценаріями збільшуватиметься і кількість опадів. За таких умов за сценаріями, побудованими на основі моделей CCCM і GISS, температура повітря зросте найбільш суттєво взимку, а за сценаріями GFDL та UKMO – навесні (Shvidenko et al., 2017). Проте тільки за останнім сценарієм потепління в Україні чітко підсилюватиметься в напрямку з півдня на північ. Підвищення середньорічної температури, величини радіаційного балансу і суми активних температур за рік призведе до збільшення інтенсивності вивітрювання, синтезу органічної маси та активізації життєдіяльності тварин і мікроорганізмів (Didukh, 2009).

Останніми десятиріччями циклічні зміни погодних умов на значній частині земної кулі супроводжуються тенденціями до підвищення температури повітря, зменшення кількості опадів та зниження рівня ґрунтових вод. Вегетаційний період розпочинається у більш ранні дати, а закінчується у більш пізні. У зв'язку з останнім порушилася синхронність сезонного розвитку шкідливих організмів, пов'язаних як із кормовими рослинами, так і з природними ворогами. Зокрема, деякі комахи стали більш агресивними, а ентомофаги не в змозі їх знищувати, оскільки терміни їх розвитку не завжди

збігаються з появою уразливої стадії шкідника.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Важливими для життя лісу є аналіз та оцінка негативних видів впливу, що пов'язані з вологою та її критичними значеннями. Слід розрізняти атмосферну і ґрунтову посуху. Перша є наслідком високої температури повітря, спричиненої радіаційним нагріванням або надходженням сухих повітряних мас з інших територій та тривалою відсутністю дощів і може призвести до ґрунтової посухи. Підвищене фізичне і фізіологічне випаровування призводить до зниження рівня вологості ґрунту та запасів води у ньому. За таких умов настає ґрунтова посуха, наслідком якої є не тільки всихання дерев, а й загибель деревостанів (Yavorovsky, 2015).

Не викликає сумніву й те, що несприятливі метеорологічні чинники, зокрема їх відхилення від багаторічних середніх показників, є передумовою погіршення санітарного стану і в'язових деревостанів зокрема. Численними дослідженнями встановлено, що під впливом несприятливих метеорологічних факторів насадження ослаблюються і стають сприйнятливішими до інфекційного ураження збудниками грибною й бактеріальною етіології та заселення комахами-ксилофагами (Vorontsov, 1972). Заселення дерев представниками шкодочинної ентомофауни спричиняє пришвидшення масового відпаду та всихання листяних деревостанів. Різкі коливання температури і кількості опадів порівняно з багаторічними середніми показниками призводять до порушення життєвих функцій деревних рослин та створюють сприятливі умови для патогенної мікрофлори і комах-ксилофагів (Goychuk et al., 2004).

Останнім часом усе більше дослідників зазначають, що процес всихання широколистяних лісів має інфекційне походження. А. І. Воронцов (Vorontsov, 1972) вказував на поширення судинних хвороб-

мікозів, яким властиве закупорення судин. За його даними, більшість досліджених дерев були пошкоджені стовбуровими шкідниками, до 80 % – уражені судинним мікром. За літературними даними (Guryanova, 1961; Gusteleva, 1980; Harrington, & McNew, 2001; Meshkova, 2019; Mozolevskaya et al., 1987), які підтверджуються результатами проведених досліджень (Yavniy, & Puzrina, 2017), область поширення голландської хвороби збігається з ареалом проживання жуків-кородів: заболонника в'язового, або струменистого *Scolytus multistriatus* Marsh., заболонника руйнівника *Scolytus scolytus* F. та заболонника пігмея *Scolytus pygmaeus* F. Древа в'язових заражаються за умов додаткового живлення заболонників, що відбувається на тонких гілках. Тобто комахи мають можливість переносити і заносити спори безпосередньо в судини. Загибель в'язів зазвичай настає через 2–3 роки після прояву перших симптомів ураження голландською хворобою. Як зазначають науковці, періоди погіршення стану лісів збігалися з посухами, які часто реєструють у роки спаду сонячної активності, як і підвищення температури та зниження рівня ґрунтових вод. Тобто умови для росту рослин у такі роки погіршуються, і саме такий черговий період розпочався 2014 року (Meshkova, 2016).

Мета дослідження. Визначити залежність популяційних показників комах-ксилофагів в'язових насаджень від метеорологічних чинників.

Матеріали і методи дослідження. За умов дослідження пошкоджених стовбуровими шкідниками в'язових деревостанів було закладено 10 пробних площ у в'язових насадженнях комунального підприємства «Дарницьке лісопаркове господарство», в яких відібрано модельні дерева. Кожне модельне дерево очищали від сучків, встановлювали протяжність районів тонкої і товстої кори. Окремо, на сухих і всихаючих деревах визначали видовий склад і проводили облік повно-

ти поселення, тобто визначали середню кількість родин різних видів шкідливих комах на один квадратний дециметр поверхні стовбура. Для аналізу загальних тенденцій і закономірностей зміни клімату в районі розташування лісів у процесі досліджень використовували архівні дані метеоспостережень за період 14 років для Київської області. Для оцінки впливу зміни погодних умов розраховано індекс аридності за де Мортонем (V), що визначається як частка розподілу річної суми опадів (R) та за середньорічною температурою повітря (t) і дає змогу оцінити ступінь вологості клімату:

$$V = R/(t + 10), \quad (1)$$

де R – річна сума опадів, см;

t – середньорічна температура, °С.

Кількісна характеристика популяції комах дає змогу встановити її стан та вплив на лісові насадження. З цією метою використовують різні показники (параметри), серед яких: чисельність, поширеність і шкодочинність комах. При дослідженні видового складу кожне модельне дерево очищали від сучків. На стовбурі від основи до верхівки знімали стрічку кори шириною 10 см. У межах фактичних районів поселення кожного виду закладали облікові палетки, на яких визначали щільність поселення та реальну плодючість (Meshkova et al., 2010). За кількістю маточних ходів стовбурових шкідників на 1 дм² на безкорій стороні стовбура визначали райони і щільність їх поселення та енергію розмноження популяції.

Для оцінки ролі типовості окремих видів та їх домінування в насадженнях було розраховано частоту трапляння видів за формулою:

$$A = \frac{B \times 100}{C} \%, \quad (2)$$

де A – частота трапляння видів;

B – кількість дерев, на яких виявлено певний вид, шт.;

C – загальна кількість дерев, шт.

Результати дослідження та їх обговорення. Для аналізу загальних тенденцій і закономірностей зміни клімату в районі розташування лісів у процесі досліджень використовували архівні дані метеоспостережень за період 14 років. За аналізом основних показників погодних умов регіону дослідження, зокрема, температури повітря (мінімальна, максимальна та середньорічна) та кількості опадів (сума опадів і кількість днів з опадами), отриманих з офіційного архіву погоди, було зафіксовано стійку тенденцію до підвищення середньорічної температури регіону від 8,4 °C до 9,5 °C у 2004 та 2017 р. відповідно. Як засвідчили середні значення температури повітря за останні роки, вона коливалася в межах 8,3 °C–10,0 °C, причому максимуму досягла в 2015 р. за водночас найменшої кількості опадів за рік (442 мм). Максимум припадає на 2012 і 2013, а роками з аномально низькою для регіону сумою річних опадів були 2009 і 2015 відповідно.

Виявлено, що характерною особливістю нинішнього типу погоди є стійка тенденція до різкого коливання кількості опадів. Особливо виразно вона проявлялась упродовж останніх років. Се-

редня кількість опадів за рік і вегетаційний період 2012–2013 рр. перевищувала норму, а у 2015 р. вирізнялася різким дефіцитом атмосферної вологи. Багаторічна норма середньої температури повітря за рік украй малозмінна, фактично є сталою величиною. Відхилення від норми слугує доказом кардинальних змін теплового режиму і пов'язується з потеплінням клімату (рисунок).

За наведеними даними, розподіл опадів і показників температури за роками відбувався нерівномірно, причому найкритичніші значення для регіону цей показник набував у 2007 і 2009 роках, сягнувши мінімуму 2,2 у 2015 році. Цілком логічно, що за таких умов спостерігається погіршення санітарного стану деревостанів, також і за участі в'яза, що безперечно пов'язано з екологічними особливостями рослин згаданого роду, зокрема їхньою залежністю від вологості та родючості ґрунту.

Один з основних показників масового розмноження комах-ксилофагів – це показник енергії розмноження, що характеризує здатність популяції до збільшення поширення свого ареалу. Енергію розмноження розраховують як співвід-

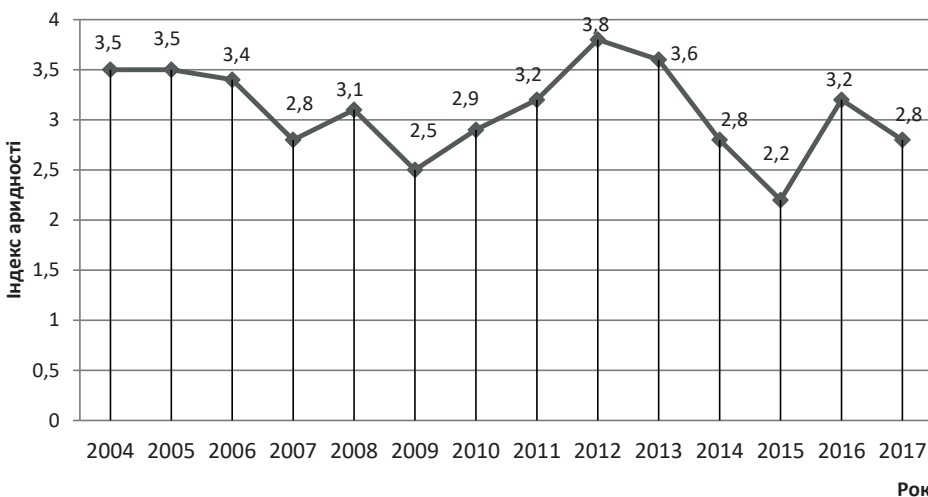


Рисунок. Індекс аридності клімату Київського Полісся

1. Залежність енергії розмноження популяції стовбурових шкідників від середньої температури, кількості опадів та індексу аридності

Рік	Середня температура повітря, °С	Кількість опадів, мм	Індекс аридності	Енергія розмноження популяції
2004	8,4	622	3,5	1,3
2005	8,3	640	3,5	1,6
2006	8,0	617	3,4	1,1
2007	9,6	558	2,8	2,0
2008	9,5	602	3,1	1,9
2009	9,0	472	2,5	2,2
2010	9,0	563	2,9	2,4
2011	8,7	597	3,2	1,8
2012	8,7	711	3,8	1,4
2013	9,2	700	3,6	1,6
2014	9,0	528	2,8	1,8
2015	10,0	442	2,2	2,7
2016	9,2	624	3,2	1,8
2017	9,5	549	2,8	2,6

ношення короїдного приросту та короїдного запасу для популяції загалом, вона характеризує зміни чисельності комах від початку заселення дерев до вильоту жуків молодого покоління, тобто за період розвитку комахи в дереві (табл. 1).

Треба зазначити, що у разі, якщо енергія розмноження перевищує 1,0 – осередок матиме тенденцію до поширення, якщо менше ніж 1,0 – до зменшення своєї площі. За наведеними даними, енергія розмноження становить від 1,1 до 2,7, тобто це свідчить про постійне збільшення ареалу поширення заболонників. Тож зрозуміло, що показник енергії розмноження заболонників пов'язаний із показником аридності клімату, і тому можливий висновок, що існує висока ймовірність виникнення нових осередків усихання в'язових деревостанів у майбутньому. За аналізом зміни показників популяції за фазами розвитку осередків досліджувані насадження у динаміці з 2004 до 2006 р. перебували у стані розсіювання або так званої кризи, а починаючи з 2007 р. – у стані власне спалаху осередку.

Щорічні зміни чисельності заболонників значною мірою залежать від по-

годних умов. Найбільше значення для в'язових заболонників мають умови перезимівлі та сума позитивних температур (із травня до кінця липня – в період вильоту жуків після зимівлі молодого покоління, під час періоду інтенсивного льоту жуків, додаткового живлення і заселення дерев). У спекотне літо заболонники встигають пройти розвиток повністю і йдуть на зимівлю у фазі молодого жука (імаго). Це, своєю чергою, збільшує життєздатність заболонників під час зимівлі та вильоту навесні наступного року. Така закономірність підтверджується і проведеними спостереженнями. Зокрема за нестачі або зниження кількості опадів стостерігається тенденція до підвищення енергії розмноження заболонників, що чітко простежується за показниками 2007, 2009 і, особливо, посушливого для регіону 2015 р., які відповідно становлять 2,0, 2,2 і 2,7.

Видовий склад короїдів на в'язі представлений осередками масового розмноження *Scolytus multistriatus* Marsh., *S. pygmaeus* F. та *S. scolytus* F. Для виявлення видового складу і перспектив розмноження стовбурових шкідників на типових пробних площах проведено ана-

2. Ступені заселення дерев стовбуровими шкідниками

Склад деревостану	Вид					
	заболонник руйнівник <i>Scolytus scolytus</i>		заболонник в'язовий <i>Scolytus multistriatus</i>		заболонник пігмей <i>Scolytus pygmaeus</i>	
7Брс1Дз2Влч	1,9±0,6	високий	2,5±1,3	високий	2,7±0,6	високий
4Бп3Ос1Брс1Сз1Акб	0,7±0,2	низький	1,1±0,9	низький	1,3±0,7	середній
5Дз2Т62Брс1Бп	1,5±0,4	середній	1,5±0,5	середній	1,8±0,6	високий
9Врб1Брс	–	–	–	–	0,1±0,2	низький
6Сз3Дз1Брс	–	–	0,8±0,8	низький	–	–
3Бп3Брс2Сз1Дз1Ос	1,6±0,3	середній	1,7±0,7	середній	–	–
7Дз2бп1Брс+Ос	–	–	–	–	1,8±0,9	високий
8Дз2Брс+Бп	1,6±0,6	середній	0,9±0,6	низький	–	–
8Ос2Брс	0,6±0,3	низький	0,9±0,4	низький	–	–
3Дз3Брс1Бп3Сз	1,5±0,8	середній	0,2±0,3	низький	1,4±0,4	середній

ліз модельних дерев, де з цією метою використано вітровальні та сухостійні дерева (табл. 2).

Отримані результати порівнювали з табличними показниками, за якими і визначали ступені заселення дерев на пробних площах (Mozolevskaya et al., 1987).

Частота трапляння видів заболонників становить: в'язового – 68,2 %, пігмея – 36,4 % і руйнівника – 31,8 %. Вивчення додаткового живлення заболонника у кронах показало, що вони інтенсивно ушкоджують однорічні та дворічні пагони. Як уже зазначено, у спекотне літо заболонники встигають пройти розвиток повністю і йдуть на зимівлю у фазі молодого жука, що своєю чергою посилює їхню життєздатність під час зимівлі й вильоту навесні наступного року. Наприклад, у весняно-літні періоди 2015 і 2016 рр. з квітня до вересня зафіксовано перевищення багаторічних значень середньомісячних температур, що призвело до вильоту другого покоління заболонників на початку серпня в ці роки. За умов додаткового живлення на тонких гілках заболонники не можуть доставити інфекцію безпосередньо в основні провідні канали. При цьому, за проведеними спостереженнями, заражається менше ніж 50 % гілок. Інтенсивніше інфікуються листові рубці на тонких гілках, куди також часто вточуються за-

болонники під час додаткового живлення. Різноманітність умов і екологічна пластичність заболонників забезпечують постійну присутність у насадженнях переносників інфекції, які проходять додаткове живлення. Причому літ основної маси жуків синхронізований із періодом найбільшої сприйнятливості в'язів – кінець травня – червень, коли сокорух сприяє швидкому рознесенню спор збудника всередині дерева. За наведеними даними, осередки стовбурових шкідників характеризуються високим, середнім і низьким ступенем заселення дерев. Для виявлення видового складу та перспектив розмноження стовбурових шкідників на типових пробних площах було проведено аналіз модельних дерев. Під час проведення досліджень виявлено осередки поселення таких видів заболонників: *Scolytus scolytus*, *S. multistriatus* та *S. pygmaeus*.

Для кожної фази розвитку осередків масового розмноження характерні свої значення показників стану популяції комах і деревостану. Встановлено тісний зв'язок поширення графіозу з осередками розмноження та поширення стовбурових шкідників, оскільки гриби, якими короїди інфікують дерева, допомагають їхнім личинкам перетравлювати деревину і тому перебувають у взаємопов'язаному симбіозі. Зокрема, при дослі-

3. Частота трапляння заболонників на пробних площах

Вид	Частота трапляння видів на пробних площах, %									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Scolytus scolytus</i>	34,70	11,60	–	–	–	21,0	–	26,0	6,50	–
<i>Scolytus multistriatus</i>	32,50	8,71	15,10	5,04	25,60	–	–	5,50	4,58	1,65
<i>Scolytus pygmaeus</i>	18,50	16,90	20,80	7,88	–	–	17,50	–	–	18,20

дженні модельних дерев із початковою стадією всихання виявлено маточні й личинкові ходи згаданих стовбурових шкідників, які характеризуються високою щільністю заселення, та встановлено досить високу кількість молодих особин, що вилітають із вихідних льотних отворів у корі. З'ясовано, що для *S. pygmaeus* це становить у середньому 24 особини на 1 дм², для *S. multistriatus* – 3 особини відповідно, що є ознакою незворотного патологічного процесу для заселених деревостанів. Коефіцієнт енергії розмноження для згаданих видів шкідників становить у середньому 2,6, що відповідає II фазі спалаху (власне спалах, тобто період, який характеризується максимальними показниками розвитку популяції). Порушення стійкості насаджень часто відбувається під впливом кількох чинників та взаємодії численних представників гетерокомплексу лісових деревних рослин, що трофічно і топічно пов'язані з ними. У такому випадку не завжди буває просто виділити найважливіші з них або встановити їх пріоритетність. У досліджуваних насадженнях має місце дуже сприятлива комбінація чинників для розвитку голландської хвороби: наявність потужного інфекційного фону; висока чисельність в'язових заболонників – найбільш небезпечних переносників захворювання; велика кількість дерев найбільш чутливого віку; зараження порослі; значна густина деяких куртин, яка робить можливим передачу інфекції через корені. Унаслідок сталося стрибкоподібне наростання темпів всихання майже на всіх ділянках в'язових деревостанів незалежно від їхнього віку, й у молодих посадках також,

де хвороба перебігає в гострій формі й рівень ураженості дерев сягає 33 %. Решта осередків графіозу перебувають на більш ранніх стадіях, характеризуються накопиченням рівня інфекції та зростанням чисельності її переносників.

У процесі дослідження розраховано частоту трапляння видів заболонників у деревних рослинах в'язових на пробних площах (табл. 3).

Встановлено, що найчастіше в осередках голландської хвороби в'язових трапляється заболонник в'язовий *S. multistriatus*, проте його популяції формують осередки, що характеризуються середнім і низьким ступенем заселення дерев. Це вказує на хронічність осередків, яким притаманні тривалий період існування, невисокий, хоча й підвищений (порівняно зі здоровими насадженнями), рівень чисельності комах і розмір поточного відпаду. Епізодичні осередки, або осередки масового розмноження, де було закладено пробні площі № 1, 3 і 7 з перевагою у популяції *Scolytus pygmaeus*, вирізняються порівняно коротким (3–5 років) періодом розвитку, високим рівнем чисельності й розміром поточного відпаду. В обох випадках можливі зворотні та незворотні реакції деревостанів, хоча в другому, за умов масових розмножень, найчастіше відбувається повне руйнування насадження.

Під час статистичного оброблення отриманих результатів встановлено залежність між кліматичними показниками та енергією розмноження короїдів (табл. 4).

У проведених дослідженнях перевіряли наявність і тісноту зв'язку між се-

4. Залежність між кліматичними показниками та енергією розмноження

Коефіцієнт кореляції	Показник	Середня температура повітря, °С	Кількість опадів, 10 мм	Індекс аридності	Енергія розмноження популяції
Пірсона	Середня температура повітря, °С	1	-0,498	-0,669**	0,787**
	Кількість опадів, 10 мм	-0,498	1	0,972**	-0,739**
	Індекс аридності	-0,669**	0,972**	1	-0,838**
	Енергія розмноження популяції	0,787**	-0,739**	-0,838**	1
Тау-в Кендалла	Середня температура повітря, °С	1	-0,352	-0,468*	0,640**
	Кількість опадів, 10 мм	-0,352	1	0,904**	-0,596**
	Індекс аридності	-0,468*	0,904**	1	-0,705**
	Енергія розмноження популяції	0,640**	-0,596**	-0,705**	1
Ро Спірмена	Середня температура повітря, °С	1	-0,478	-0,615*	0,765**
	Кількість опадів, 10 мм	-0,478	1	0,967**	-0,773**
	Індекс аридності	-0,615*	0,967**	1	-0,855**
	Енергія розмноження популяції	0,765**	-0,773**	-0,855**	1

* Кореляція є значущою на рівні 0,05.

** Кореляція є значущою на рівні 0,01.

редньою температурою, кількістю опадів та індексом аридності, енергією розмноження. Як виявилось, майже всі досліджувані показники мають тісний кореляційний зв'язок із рівнем значущості 0,01. Це означає, що в середньому лише в 1 % випадків можлива помилка при перевірці гіпотези.

Враховуючи наявність зв'язку, було вирішено змоделювати залежність енергії розмноження від температури повітря та кількості опадів з метою прогнозування енергії розмноження популяцій комах-ксилофагів.

Попередній аналіз виявив алометричну залежність між досліджуваними величинами. В результаті багатоваріантного пошуку було отримано таке рівняння:

$$E_p = 1,900 \cdot t^{2,186} \cdot R^{-0,759}, \quad (3)$$

де E_p – енергія розмноження популяції;
 t – середня температура повітря, °С;
 R – кількість опадів, 10 мм.

У практиці ведення лісового господарства досить широко застосовують біоме-

тричний метод оцінки адекватності розробленої моделі на основі множинного коефіцієнта детермінації (R^2), що являє собою множинний коефіцієнт кореляції у квадраті та характеризує, яка частка варіації результуючої ознаки зумовлена зміною факторних ознак, що входять до багатоваріантної регресійної моделі (Shmoilova et al., 2005). Іншими словами, множинний коефіцієнт детермінації вказує, яка частка вихідної мінливості пояснюється цією моделлю. Для отриманої моделі він становив 0,753, отже, отримана модель описує 75 % емпіричних значень.

На підставі проведених робіт виявлено певну закономірність виникнення осередків усихання в'язових, а також чітке приурочення ареалу поширення відповідних видів стовбурових шкідників до причин ослаблення в'язових деревостанів на окремих територіях.

Висновки і перспективи. Аналіз загального фітосанітарного стану в'язових деревостанів Київської області засвідчив

чітку картину деградації в'язових деревостанів від шкодочинної дії спалаху масового розмноження стовбурових шкідників та поєднаних із ними офіостомових грибів. Зважаючи на наведене вище, можна зробити висновок, що кінцевою причиною всихання дерев є дія комплексу негативних факторів, а саме розмноження та поширення стовбурових шкідників, зокрема *S. scolytus*, *S. multistriatus* та *S. rugmaeus*, та збудників судинного мікозу (офіостомових грибів) в умовах спалаху масового розмноження перших. Це підтверджує ситуація, за якої переважна більшість осередків всихання в'яза зосереджена в лісових насадженнях із найбільш сприятливими умовами для розвитку та розширення кормової бази популяції комах-ксилофагів.

Як засвідчив аналіз кліматичних показників регіону, в районі розташування лісів Київського Полісся впродовж тривалого часу спостерігаються посушливі явища. Через значний вплив на стан деревостанів аномально високих температур протягом вегетаційного періоду і зневоднення лісорослинних умов, насаджень в'язових втратили біологічну стійкість, перебувають на різних стадіях ослаблення і розладу та стали потенційно уразливішими щодо негативного впливу комплексу шкідників і збудників хвороб. За підсумковими оцінками, у прогнозуванні всихань доцільно виходити з того, що площа деревостанів, уражених патогенними комплексами, у майбутньому тільки зростатиме.

Список літератури

- Buksha, I. F., Gozhik, P. F., & Emelianova, J. L. (1998). *Ukraine and the global greenhouse effect. Vulnerability and adaptation of environmental and economic systems to climate change*. Kyiv: Published by the Agency for Rational Use of Energy and Ecology [in Ukrainian].
- Debrynyuk, Y. M., & Skolsky, I. M. (2012). Features of cultivation of plantations with the participation of species of the genus *Ulmus* L. in the Western Forest-Steppe of Ukraine. *Science. Proceedings: Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 10, 94–103 [in Ukrainian].
- Didukh, Y. P. (2009). Environmental aspects of global climate change: causes, consequences, actions. *Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2, 34–44 [in Ukrainian].
- Goychuk, A. F., Gordienko, M. I., Gordienko, N. M., et al. (2004). *Pathology of oakery*. Kyiv: Published by NNCIAE [in Ukrainian].
- Guryanova, T. M. (1961). On the role of stem pests in the development of Dutch disease. *Proceedings of the Khopersky Reserve*, 4, 13–18 [in Russian].
- Gusteleva, L. A. (1980). Microflora of a weakened tree and its role in the life of xylophagous insects. *The reaction of the tree to insect*, 3(6), 75–82 [in Russian].
- Harrington, T. C., & D. McNew, J. (2001). Steinelatall. Phylogeny and taxonomy of the *Ophiostoma piceae* complex and the Dutch elm disease fungi. *Mycologia*, 93(1), 111–136.
- Meshkova, V. L. (2016). A pine-tree withers. Who is guilty? *Forest announcer*, 2(53), 8–10 [in Ukrainian].
- Meshkova, V. L. (2019). Vascular diseases of trees. Dutch elm disease. *Forest herald*, 4–5, 8–11 [in Ukrainian].
- Meshkova, V. L., Gamayunova, S. G., Novak, L. V., et al. (2010). *Methodical recommendations for the survey of the centers of stem pests of the forest*. Kharkiv: URIF [in Ukrainian].
- Mozolevskaya, E. G., Belova, N. K., Krylova, N. V., & Osipov, I. N. (1987). Ecology of sap-carriers of the Dutch disease. *Plant protection*, 7, 37–40 [in Russian].
- Polissya climate: research of scientists and long-term weather forecast for Polissya (2018). Available at <http://www.polissya.eu/2012/01/wetlandsclimate-polissya-proekt-es.html> [in Ukrainian].
- Shmoilova, R. A., Minashkin, V. G., Sadovnikova, N. A., & Shuvalova, E. B. (2005). *Theory of statistics*. Moscow: Finance and statistics [in Russian].
- Shvidenko, A., Buksha, I., Krakovska, S., & Lakyda, P. (2017). Vulnerability of Ukrainian forests to climate change. *Sustainability* [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.3390/su9071152>
- Shvidenko, A., Lakida, P., Shchepachenko D., et al. (2014). *Carbon, climate and land man-*

- agement in Ukraine: forest sector. Korsun-Shevchenkivskiy: FOP Gavrilenko [in Ukrainian].
- Vorontsov, A. I. (1972). The role of forest pathological factors in the drying out of oak forests on the Russian Plain. *On measures to improve the condition of oak forests in the European part of the RSFSR: abstracts of scientific and technical reports. Meeting, 2* (3), 9–13 [in Russian].
- Yavniy, M. I., & Puzrina, N.V. (2017). Analysis of the population indicators of stem pests in the center of *Graphium ulmi*. *Scientific Bulletin of NULE of Ukraine. Series: Forestry and Ornamental Horticulture, 198*, 109–114 [in Ukrainian].
- Yavorovsky, P. P. (2015). Impact of climate change on forest ecosystems. *Forest and landscape gardening, 6*. Available at http://nbuv.gov.ua/UJRN/licgoc_2015_6_14 [in Ukrainian].
-

Puzrina, N. V., Yavniy, M. I. (2020). Influence of meteorological factors on weakening of elm trees under conditions of development of insect-xylophages. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science, 11* (3) 45–54. <https://doi.org/10.31548/forest2020.03.005>

The biological resistance of species of the genus Ulmus L. is interrelated with various biotic, abiotic and anthropic factors, in particular, abrupt changes in the hydrothermal regime, failure to comply with the rules of intermediate cutting management in the stands with these species, damage by leaf and stem insect pests that transmit and spread the infection, infectious agents, agents of undetermined etiology, etc. It has been discovered that the uneven distribution of rainfall over the years (the least rain in the research area fell in 2007, 2009 and 2015) induced deterioration of the sanitary state of elm woody plants, which caused them being affected by pathogens of mushroom and bacterial etiology and their settlement by xylophagous insects. On the basis of the analysis of changes in the population parameters in the phases of the development of the hotbeds of these pests it was shown that the studied plantations in the dynamics during the period from 2004 to 2006 were in a state of dispersion or the so-called crisis, but, starting from 2007, transformed into a state of the actual outbreak of the hotbed. Detected hotbeds of stem pests are characterized by high, medium and low degree of settlement of trees. At the same time, it was recorded that chronic hotbeds are characterized by a long period of existence, relatively low, although elevated (in comparison with healthy plantings), the number of insects and the size of the current dead trees; for episodic hotbeds, or hotbeds of mass reproduction, – a relatively short (3 to 5 years) period of development, a great number and size of the current dead trees. It has also been found that in both cases there are possible inverse and irreversible reactions of tree stands, although in the second scenario of the development of the population of pests, in the conditions of their mass reproduction, the full destruction of the forest plantation is most often observed. It was recorded that, near the hotbeds of mass reproduction, which are characterized by excessive population density, migration centers usually appear, where harmful insects migrate in search of new settlements.

Keywords: population, breeding centers, stem pests, maximum number, population indicators.

Отримано: 2020-05-21

РИЗИКИ РОЗВИТКУ ІРЖАСТИХ ГРИБІВ (*RUSSINIA GRAMINIS* PERS.) НА КУЛЬТИВОВАНИХ БАРБАРИСАХ (РІД *BERBERIS* L.)

О. В. РЕШЕТЮК, кандидат біологічних наук, доцент
<https://orcid.org/0000-0001-6620-5437>, e-mail: o.reshetyuk@chnu.edu.ua

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

А. Б. ФІЛІПЕНКО, кандидат біологічних наук, доцент
e-mail: filipter@rambler.ru

Східноєвропейський національний університет ім. Лесі Українки

Види роду *Berberis* L. – перспективні плодіві, лікарські, медодайні та декоративні рослини, які донедавна широко культивували в Україні та світі. Виявлення причетності цих рослин до поширення іржастих грибів (*Russinia graminis* Pers.) призвело до різкого скорочення культури барбарисів. Однак ступінь ризиків розвитку іржастих грибів на різних за походженням видах культивованих барбарисів досі залишається невизначеним. Ми дослідили ризики розвитку *Russinia graminis* на культивованих видах барбарисів різного географічного походження в умовах ботанічного саду Чернівецького національного університету та в деяких інших колекціях інтродуцентів на території Чернівецької області. Розвиток іржастих грибів вивчали за ступенем ураження листків барбарисів, відповідно до рекомендацій В. М. Андросової, В. К. Купріянової та О. Н. Антонової. За період спостережень ступінь ураження листків барбарисів не перевищував 12–15 %. Встановлено залежність розвитку грибів на барбарисах від географічного походження видів і погодних умов квітня–травня, коли *Russinia graminis* активно розвивається і поширюється. Найбільш стійкими до іржастих грибів є види південнокитайського (східноазіатського) регіону. Найбільшу уразливість встановлено у видів барбарисів із Гімалаїв, Середньої Азії та Європи. Визначено три групи видів за показником стійкості до іржастих грибів: цілком стійкі (*B. beaniana*, *B. brachypoda*, *B. dasystachya*, *B. dielsiana*, *B. gagnepainii*, *B. gilgiana*, *B. holstii*, *B. thunbergii*), порівняно стійкі (*B. aetnensis*, *B. aggregata*, *B. angulosa*, *B. circumscerrata*, *B. lycium*, *B. oblonga*, *B. orthobotrys*, *B. spathulata*) та нестійкі до ураження (*B. aemulans*, *B. alksuthiensis*, *B. amurensis*, *B. aristata*, *B. coreana*, *B. dielsiana*, *B. edgeworthiana*, *B. giraldii*, *B. integerrima*, *B. laxiflora*, *B. notabilis*, *B. regeliana*, *B. reticulata*, *B. vulgaris*). 16 видів барбарисів рекомендовано впроваджувати в культуру, використовувати в декоративному озелененні та створювати спеціалізовані плантації сировинного призначення. Культивування інших видів потребує певних обмежень (наприклад, лісопаркового оточення) для захисту зернових ланів.

Ключові слова: іржасті гриби, телеїтоспори, базидіоспори, барбариси, озеленення, хлібні злаки.

Актуальність та аналіз останніх досліджень. Для вирощування сільськогосподарських злаків надзвичайно важливо не допустити їх ураження небезпечними хворобами, зокрема іржастими грибами, які поширюються в середовищі спорами від барбарисів. Разом з тим, представники роду *Berberis* L. (*Berberidaceae* Juss.) надзвичайно перспективні як цінні плодіві, лікарські, медодайні, а також декоративні

чагарникові рослини (Vinogradova, 1988; Kohno, & Kurdiuk, 1994; Reshetyuk, & Filipenko, 2018). Центром родового ареалу барбарисів є китайсько-тібетський рослинно-кліматичний район, де зосереджено найбільшу кількість видів цих рослин (Vinogradova, 1988). У помірних широтах Євразії та Америки трапляються до 175 видів барбарисів, культивування яких у Європі починалось ще у XIV–XV ст.

(Filipenko, 1979; Kohno, & Kurdiuk, 1994). Але наприкінці XVII ст. було виявлено причетність цих рослин до поширення іржастих грибів (*Puccinia graminis* Pers.), які паразитують на хлібних злаках, що стало причиною різкого скорочення культури барбарисів (Slizik, 1964; Dzhiyembayev, Vubentsov, & Turapin, 1974). При дозріванні базидіоспори гриба відкидаються увсебіч і розносяться потоками повітря. Так базидіоспори потрапляють на листки барбарисів, де формується весняна фаза розвитку збудника стеблової іржі злаків. Сучасні відомості щодо поширення та культивування видів роду *Berberis* в Україні наведено у публікаціях і звітах провідних ботанічних установ (Kohno, & Kurdiuk, 1994), поглиблене вивчення біологічних особливостей видів роду проведено в умовах Передкарпаття (Filipenko, 1979), Західного Лісостепу (Jakobchuk, & Parhomenko, 2013) та Південного берега Криму (Galushko, Isikov, & Gerasimchuk, 2005). Разом з тим, було встановлено (Golovin, 1960; Chumakov, 1972; Krizhanovskaya, 1980; Androsova, 1989), що небезпеку для вирощування злакових культур барбариси становлять лише тоді, коли деякі з видів зростають у безпосередній близькості до ланів із хлібними злаками. Однак ступінь ризиків розвитку іржастих грибів на різних за походженням видах культивованих барбарисів досі залишався невизначеним, тому це є надзвичайно актуальною проблемою для культивування цих рослин у зоні вирощування сільськогосподарських злаків.

Мета дослідження. Метою нашого дослідження була оцінка ризиків розвитку іржастих грибів на культивованих видах барбарисів, що дало можливість виявити найбільш стійкі до таких захворювань види та рекомендувати їх для використання у декоративному озелененні, а також для створення спеціалізованих плантацій сировинного призначення. Об'єктами досліджень упродовж 2014–2018 рр. стали 30 видів барбарисів різного географічного походження, культиво-

ваних в умовах ботанічного саду Чернівецького національного університету та в деяких інших колекціях інтродуцентів на території Чернівецької області.

Матеріали і методи дослідження. Розвиток іржастих грибів на барбарисах вивчали за ступенем ураження листків (методики Androsova, 1989; Kupriyanova, & Antonova, 1980). Для аналізу відбирали модельні кущі барбарисів у колекціях ботанічного саду Чернівецького національного університету (по два кущі кожного виду барбарису). Ступінь розвитку іржастих грибів (%) установлювали за кількістю уражених листків на модельних кущах і за покриттям листків грибами (гіфовими) виразками. Ці показники обробляли за формулою:

$$R = (S_1 + S_2) / 2,$$

де S_1 – кількість уражених грибноцею листків куща (%);

S_2 – пересічна ступінь ураженості листів грибноцею (%).

При аналізі ступеня ураженості листків урахували географічне походження барбарисів, що дало можливість виявити певні закономірності стійкості окремих видів до ураження іржастими грибами. Щоб оцінити рівень залежності розвитку іржастих грибів від погодних умов року, порівнювали ступінь розвитку грибів із показниками погоди (температурний режим і кількість опадів). Виконаний аналіз погодних показників квітня–травня за період спостережень також підтвердив залежність від них активності проростання телейтоспорів *Puccinia graminis* та утворення базидій із базидіоспорами.

Результати дослідження та їх обговорення. У результаті польових обстежень ми встановили, що вже на початку травня на листках деяких видів барбарисів з'являються жовтогарячі плями, створені гіфами пукцинії, яка починає розвиватися, утворюючи своєрідні переплетення міцелію. Ці структури називають спермогоніями, або пікнідами. Вони утворюють пікноспори, після дозрівання яких з отворів

спермогоніїв виділяється солодкувата рідина, що приваблює комах. На нижній поверхні листків закладаються інші спорношення – еції, де формуються двоядерні еціоспори у вигляді ланцюжків. На листках барбарису з верхнього боку *P. graminis* утворює поодинокі спермогонії або невеликі їх групи. Вони кулясті, 120–130 мкм у діаметрі, темно-жовтого забарвлення. У них формується велика кількість дрібних, світлих, одноклітинних спор – спермацій, за допомогою яких відбувається запліднення інших спермогоніїв. Цим і пояснюється утворення нових біологічних форм і рас гриба. Встановлено, що деякі іржасті гриби можуть розвиватись на дуже

складних штучних середовищах. Через 2–5 діб після спермогоніїв із нижнього боку листків барбарису, а іноді на черешках і молодих пагонах утворюються еції, які розміщуються округлими або довгастими групами. Еції циліндрично-чашоподібні, з відігнутими краями, білувато-жовті, 2–3 мм у діаметрі. Клітини перидію щільно з'єднані, прямокутні, мають зовнішню стінку оболонки завтовшки 7–13 мкм із бородавками.

Результати наших досліджень, якщо їх аналізувати в сукупності, виявили порівняно невисокі показники інтенсивності ураження листків барбарисів іржастими грибами (таблиця).

Ступінь ураження листків барбарисів іржастими грибами (%)

№	Види барбарисів	Роки спостережень				
		2014	2015	2016	2017	2018
1	<i>B. aemulans</i> Schneid.	10	10	12	10	6
2	<i>B. aetnensis</i> Presl.	10	8	10	10	6
3	<i>B. aggregata</i> Schneid.	9	8	10	8	4
4	<i>B. alksuthiensis</i> Usteri.	12	10	12	10	8
5	<i>B. amurensis</i> Rupr.	15	12	15	12	10
6	<i>B. angulosa</i> Wall.	10	6	8	10	5
7	<i>B. aristata</i> D. C.	10	10	12	10	8
8	<i>B. beaniana</i> Schneid.	-	-	-	-	-
9	<i>B. brachypoda</i> Maxim.	-	-	-	-	-
10	<i>B. circumserrata</i> Schneid.	6	5	5	4	2
11	<i>B. coreana</i> Palib.	14	10	15	9	8
12	<i>B. dasystachya</i> Maxim.	-	-	-	-	-
13	<i>B. declinata</i> Schrad.	15	10	12	10	8
14	<i>B. dielsiana</i> Fedde.	-	-	-	-	-
15	<i>B. edgeworthiana</i> Schneid.	12	8	10	12	6
16	<i>B. gagnepainii</i> Schneid.	-	-	-	-	-
17	<i>B. gilgiana</i> Fedde.	-	-	-	-	-
18	<i>B. giraldii</i> Hesse	12	10	12	10	8
19	<i>B. holstii</i> Engl.	-	-	-	-	-
20	<i>B. integerrima</i> (Reg.)Schneid.	12	8	10	10	5
21	<i>B. laxiflora</i> Schrad.	15	10	12	12	10
22	<i>B. lycium</i> Roule	10	6	10	8	5
23	<i>B. notabilis</i> Schneid.	15	10	10	12	8
24	<i>B. oblonga</i> (Reg.)Schneid.	10	5	8	10	5
25	<i>B. orthobotrys</i> Bien.	6	4	5	5	2
26	<i>B. regeliana</i> Koehe	10	6	10	12	5
27	<i>B. reticulata</i> B. Kochne	10	5	12	10	4
28	<i>B. spathulata</i> L.	10	8	10	10	6
29	<i>B. thunbergii</i> D. C.	-	-	-	-	-
30	<i>B. vulgaris</i> L.	15	12	15	10	8

За весь період спостережень ступінь ураження листків барбарисів не перевищувала 12–15 %. Разом із тим, вісім видів барбарисів виявились абсолютно стійкими проти іржастих грибів, а тому ознак ураження на них не було виявлено зовсім. Якщо порівняти ці показники з відомостями про походження окремих видів барбарисів, то можна зазначити, що найбільш стійкими до іржастих грибів є група видів, які походять із південнокитайського (східноазіатського) регіону. Більшість із них взагалі не виявили ознак ураження іржастими грибами за весь період спостережень (5 років). Найбільшу уразливість від іржастих грибів виявлено у видів барбарисів, які походять із Гімалаїв, Середньої Азії та Європи. Види китайсько-тибетського походження уражаються іржастими грибами значно менше, а чимало таких видів залишаються цілком стійкими й тому можуть бути успішно культивовані у безпосередній близькості від злакових посівів. Отже, при плануванні барбарисових культур доцільно брати до уваги походження окремих видів і, відповідно, визначати ризики їх впровадження в культуру.

За показником стійкості до іржастих грибів ми виділили серед барбарисів три групи видів:

- 1) цілком стійкі види, які не вражаються іржастими грибами за будь-яких погодних умов (*B. beaniana*, *B. brachypoda*, *B. dasystachya*, *B. dielsiana*, *B. gagnepainii*, *B. gilgiana*, *B. holstii*, *B. thunbergii*) – 8 видів;
- 2) порівняно стійкі види, рівень ураження яких іржастими грибами не перевищує 10 % поверхні листків (*B. aetnensis*, *B. aggregata*, *B. angulosa*, *B. circumserrata*, *B. lycium*, *B. oblonga*, *B. orthobotrys*, *B. spatulata*) – 8 видів;
- 3) нестійкі до іржастих грибів види, в яких ураження перевищує 10 % листової поверхні (*B. aemulans*, *B. alksuthiensis*, *B. amurensis*, *B. aristata*, *B. coreana*, *B. dielsiana*, *B. edgeworthiana*, *B. giraldii*, *B. integerrima*,

B. laxiflora, *B. notabilis*, *B. regeliana*, *B. reticulata*, *B. vulgaris*) – 14 видів.

Як видно з таблиці, інтенсивність розвитку іржастих грибів на листках барбарисів в окремі роки змінюється. За нашими спостереженнями, погодні умови року істотно впливають на ступінь ураження іржастими грибами барбарисів. У літературі теж стверджується (Dzhiyembayev, Bubentsov, & Turapin, 1974; Kupriyanova, & Antonova, 1980), що активність поширення телеїтоспорів, розвиток грибних гіфів з утворенням базидій і базидіоспорів, а також поширення останніх залежить від погодних умов квітня–травня, тобто періоду, коли вони розвиваються та переносяться вітром і комахами, уражаючи листки барбарисів.

Ми порівняли показники ураження листків із пересіченими показниками суми середньодобових температур і опадів у квітні–травні за період спостереження, і виявили між ними певну залежність (рисунок).

Зокрема, ступінь розвитку іржастих грибів на листках барбарисів прямо пропорційний динаміці наростання середньодобових температур повітря і обернено пропорційний зростанню кількості опадів у цей період. Отже, розвиток іржастих грибів на листках барбарисів різко знижується із пониженням температури повітря і зростає за підвищеної кількості опадів. Перевірка отриманих показників за поданою нижче формулою довела, що розвиток спор у *P. graminis* спостерігається за підвищення середньодобових температур понад суму 700–720°C, а зростання активного спороношення гриба відбувається вище порогу 780–820°C.

$$R = \frac{\sum V_1 V_2 - \frac{(\sum V_1)(\sum V_2)}{N}}{\sqrt{C_1 C_2}}$$

де $V_1 V_2$ – середньодобові температурні показники температури повітря за певний період (N) днів;

$C_1 C_2$ – сума опадів за цей самий період.

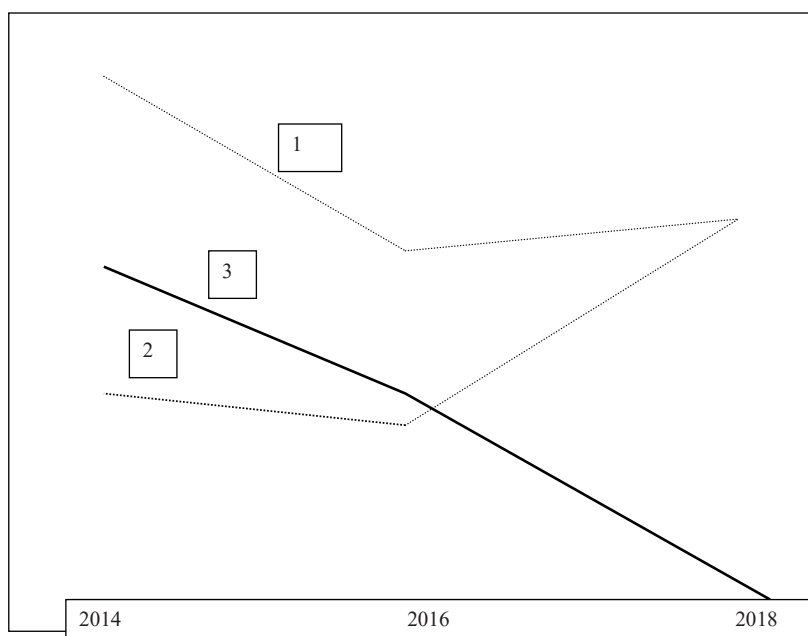


Рисунок. Залежність розвитку *Puccinia graminis* від погодних умов травня (2014, 2016, 2018 рр.): 1 – сума середньодобових температур повітря (°C); 2 – сума опадів у травні (мм); 3 – розвиток іржастих грибів на листках барбарисів (% проективного покриття поверхні листків)

Отже, в умовах вологого та теплого клімату Буковини барбариси не становлять значної небезпеки для злакових культур. Тому культивувати їх (барбариси) можна навіть у тих випадках, коли посіви злакових перебувають у безпосередній близькості з цими рослинами. Найбільш безпечними для злакових ланів є названі вище цілком стійкі види барбарисів першої групи, які можна впроваджувати у культури різного призначення: декоративні посадки, плантації лікарського, харчового або медодайного призначення. Найбільш перспективні для цього зимостійкі види (*B. brachypoda*, *B. dasystachya*, *B. gilgiana*, а також слабо уражені *B. aggregata*, *B. dielsiana*).

Деякі обмеження доцільні при плануванні культур із групи порівняно стійких видів (друга група), які не повинні зростати у безпосередній близькості до зер-

нових ланів. На нашу думку, достатнім бар'єром для них можуть бути захисні смуги з деревних порід завширшки 10–15 м. Нарешті, нестійкі до іржастих грибів види барбарисів (третя група) можна вирощувати поблизу зернових ланів лише в лісопарковому (деревному і чагарниковому) оточенні, яке повинно мати 50–100 м, завширшки або культивувати їх там, де не передбачено вирощування хлібних злаків. Крім того, відомо, що застосування калійних добрив, особливо у суміші з фосфорними, підвищують стійкість рослин до ураження іржастими грибами (Filipenko, 1979).

Висновки і перспективи. В умовах вологого і теплого клімату Чернівецької області культивування більшості барбарисів (16 видів першої та другої груп) не становить істотної загрози для вирощування хлібних злаків навіть тоді, коли

останні перебувають у безпосередній близькості до цих культур. Ризики розвитку іржастих грибів на культивованих барбарисах залежать від погодних умов квітня–травня, коли *Puccinia graminis* активно розвивається і поширюється, та географічного походження видів. Найбільш стійкими до іржастих грибів є

види південно-китайського (східноазійського) регіону. Найбільшу уразливість виявлено у видів барбарисів із Гімалаїв, Середньої Азії та Європи. Тому при плануванні барбарисових культур доцільно брати до уваги походження окремих видів і, відповідно, визначати ризики їх впровадження в культуру.

Список літератури

- Androsova, V. M. (1989). *Structural organization of the host plant and pathogen in wheat stem rust*. (Abstract of Doctoral Dissertation). Krasnodar [in Russian].
- Chumakov, A. Ye. (1972). The current state of the study of cereal rust in the USSR. *Proceedings of the All-Union Research Institute of ZR*, 33, 98–102 [in Russian].
- Dzhiyembayev, ZH. T., Bubentsov, S. T., & Turapin, V. P. (1974). Barberry and its role as a cereal stem rust intermediate. *Bulletin of Agricultural Science of Kazakhstan*, 7, 110–112.
- Filipenko, A. B. (1979). Biological features of promising species of the genus *Berberis* L. introduced in Bukovina. (Abstract of Doctoral Dissertation). Kyiv [in Ukrainian].
- Galushko, R. V., Isikov, V. P., & Gerasimchuk, V. N. (2005). *Genus Berberis L. in Crimea*. Kyiv: Ahrarna nauka [in Ukrainian].
- Golovin, P. N. (1960). *Powdery mildew fungi parasitizing cultivated and useful wild plants*. Moskva; Leningrad: Izd-vo AN SSSR [in Russian].
- Jakobchuk, O. M., & Parhomenko, L. I. (2013). Use in culture and modern state of introduction of East Asian species of the genus *Berberis* L. under conditions of Right-Bank of Forest-Steppe of Ukraine. *Introduction of plants*, 1, 41–45 [in Ukrainian].
- Kohn, N. A., & Kurdiuk, A. M. (1994). *Theoretical bases and experience of introduction of woody plants in Ukraine*. Kyiv: Nauk. dumka [in Ukrainian].
- Krizhanovskaya, M. S. (1980). Barberry as a source of stem rust renewal in the central regions of Ukraine. *Bulletin of Kiev University "Biology"*, 22, 106–110 [in Ukrainian].
- Kupriyanova, V. K., & Antonova, O. N. (1980). Barberry as a source of cereal stem rust. *Mycology and phytopathology*, 14, 7–14.
- Movseyan, M. I., & Rotova, Ye. G. (1972). Barberry fungal diseases. *Floriculture*, 2, 17 [in Ukrainian].
- Reshetiuk, O. V., & Filipenko, A. B. (2018). Genus *Berberis* L. in decorative landscaping. *Scientific Bulletin of UNFU of Ukraine*, 28 (2), 64–67 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15421/4028021>
- Slizik, L. N. (1964). On some critical species of barberry from Central Asia. *News of the taxonomy of higher plants*, 79–89 [in Russian].
- Vinogradova, O. N. (1988). *Barberry*. Moskva: Lesn. prom-st' [in Russian].

Reshetiuk, O. V., Filipenko, A. B. (2020). The growth of rusty mushrooms (*Puccinia graminis* Pers.) on barberries (genus *Berberis* L.). *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 11 (3), 55–61. <https://doi.org/10.31548/forest2020.03.006>

Formulation of the problem. Representatives of the genus Berberis L. (Berberidaceae Juss.) are extremely promising as valuable medicinal, melliferous, fruitful and also decorative shrubs. But rusty mushrooms (Puccinia graminis Pers.) are progressing, which are parasitizing on cereals. The danger for growing cereal crops, barberries have when some of their species are growing close to the field.

The aim of the study was an estimation of risk of growth rusty mushroom on cultivated species of barberries, that gave a possibility to detect the most stable to such diseases species and to recommend them for using in decorative landscaping or in plantations of raw materials. 30 species of barberries, which are cultivating in botanical garden Yurii Fedkovych Chernivtsi National University, were exploring during 2014–2018.

The growth of rusty mushrooms on barberries was studied by degree of affected leaves. The analysis of weather indicator from April–May confirmed dependence from their active germination

taleotospores *Puccinia graminis* and formation of basidiyas with basidiospores by period of oversight. The intensity of affection barberries leaves by rusty mushrooms is comparatively not high and isn't over 12–15 %. Also 8 species of barberries are detected as absolutely resistant against rusty mushrooms, so that there were no features of affection on them. If we compare these indicators with information about origin of separate species barberries, we can mark that the most resistant to rusty mushrooms are species, which are originate from South China (East Asian) region. Most of them didn't have any features of affection by rusty mushrooms in all period of oversight at all (5 years). The biggest affection from rusty mushrooms was noticed in species of barberries which come from the Himalayas, Central Asia and Europe. Therefore, in planning barberries cultivations it is expedient to consider the origin of separate species and accordingly determine risks of their introduction in culture.

We excreted 3 groups of species among barberries by degree of fortitude to rusty mushrooms:

1. Completely resistant species, which don't affect by rusty mushrooms in different weather conditions: (*B. beaniana*, *B. brachypoda*, *B. dasystachya*, *B. dielsiana*, *B. gagnepainii*, *B. gilgiana*, *B. holstii*, *B. thunbergii*) – 8 species;
2. Relatively resistant species, the level of affection of rusty mushrooms not more than 10 % of leaf surface (*B. aetnensis*, *B. aggregata*, *B. angulosa*, *B. circumserrata*, *B. lycium*, *B. oblonga*, *B. orthobotrys*, *B. spathulata*) – 8 spesies;
3. Unstable to rusty mushrooms species in which the affection is more than 10% of leaf surface (*B. aemulans*, *B. alksuthiensis*, *B. amurensis*, *B. aristata*, *B. coreana*, *B. dielsiana*, *B. edgeworthiana*, *B. giraldii*, *B. integerrima*, *B. laxiflora*, *B. notabilis*, *B. regeliana*, *B. reticulata*, *B. vulgaris*) – 14 species.

The intensity of growth rusty mushrooms on the barberry's leaves are changing the separate years. The literature confirms that the activity of dissemination taleotospores, development of mushroom hyphae with formation basidiyas and basidiospores, also dissemination the last one depends on weather conditions of April-May, that is the period when they are progressing and carrying by wind and insects affecting barberries leaves. We compared the indicators of affection leaves with average indicators of total average daily temperatures and precipitations in April-May by the period of observation, and between them had been detected certain dependence. The degree of rusty mushroom growth on barberries leaves was detected proportional to dynamics of increase middle-daily temperatures of air and inversely proportional to increasing amount of precipitation at this period.

The most dangerous for cereal fields are higher named completely resistant species barberries from the first group, which we can introduce in culture for different purpose: decorative landing, plantations of medical, nutritional or melliferous purpose. Some limitations are expedient in planning cultures with groups of relatively resistant species (the second group), which don't have to grow close to the cereal fields. In our opinion, the sufficient barrier for them can be a protective zone with woods 10–15 meters wide. At last, unstable to rusty mushrooms species of barberries (the third group), we can grow nearby the cereal fields just in forestry environment (woods and shrubs), which must be 50–100 m wide or to cultivate them where will be no growing cereals.

Thereby, in terms of wet and warm climate in Chernivtsi region the cultivation of most barberries (16 species of the first and second group) don't make any significant threat for growing cereals even when the last one are close to these cultures.

Keywords: *Puccinia graminis*, teleotospores, basidiospores, barberries, planting, cornfields.

Отримано: 2020-09-15

ІСТОРИЯ, ТАКСОНОМІЧНИЙ СКЛАД, БІОМОРФОЛОГІЧНА ТА ЕКОЛОГІЧНА СТРУКТУРИ ДЕНДРОФЛОРИ АРБОРЕТУМУ ШАЦЬКОГО ЛІСОВОГО КОЛЕДЖУ ім. В. В. СУЛЬКА

А. А. ДЗИБА, кандидат сільськогосподарських наук, доцент
<https://orcid.org/0000-0003-4422-288X>, e-mail: orhideya_oncydium@ukr.net
Національний університет біоресурсів і природокористування України

Н. П. РИБЧИНСЬКА, викладач
e-mail: rybchynska71@gmail.com

А. А. РИБЧИНСЬКИЙ, викладач
e-mail: geodezistsar@gmail.com

Шацький лісовий коледж ім. В. В. Сулька

Арборетум Шацького лісового коледжу ім. В. В. Сулька – цінний осередок дендрофлори для збагачення біорізноманіття Волинського Полісся. Займає площу 1,5 га. Наведено історію формування арборетуму Шацького лісового коледжу ім. В. В. Сулька від початку створення до сьогодні (упродовж 50 років). Представлено результати інвентаризації дендрофлори арборетуму, яка налічує 147 видів (109 рідкісних), що належать до 94 родів, 41 родини, 23 порядків, двох класів. Більшість видів належить до відділу Magnoliophyta – 115 видів (78,2 %), до Pinophyta – 32 види (21,8 %). Рослини зростають у таких видах насаджень, як групи, алеї, живоплоти, живі стіни, солітери, поширені мішані групи. 144 види деревних рослин належать до фанерофітів, переважають мезофанерофіти (38,9 %) (мегафанерофітів – 24,3 %, мікрофанерофітів – 26,4 %, нанофанерофітів – 10,4 %) та три види хамефітів.

Наведено аналіз екологічної структури (за вимогливістю до світла, вологи та ґрунту). Екологічна структура представлена переважно геміскіофітами – 65 видів (44,2 %) та геліофітами – 62 види (44,2 %), значно менше скіофітів – 20 видів (13,6 %). За вимогливістю рослин до родючості ґрунту виявлено мезотрофи – 72 види (49,0 % загальної кількості видів); дещо менше оліготрофів (27,9 %) і мегатрофів (20,4 %), найменше представлені мезооліготрофи – 2,7 %. Спектр видів деревних рослин арборетуму має шість типів гігоморф, поширеними є: мезофіти (57 видів) і ксеромезофіти (25 видів), мало поширеними – гігомезофіти (чотири види, 2,7 %). Майже однаковою кількістю представлені гірофіти (16 видів, 10,9 %), ксерофіти (16 видів, 10,9 %) та мезогірофіти (18 видів, 12,2 %), мезоксерофітів є 11 видів (7,5 %).

Оцінено сучасний стан деревних рослин: 95 % мають добрий стан, по чотири види – задовільний і незадовільний стан.

Ключові слова: дендропарк, Шацьк, екологія, таксономічний склад, створення, реконструкція.

Актуальність та аналіз останніх досліджень. Волинь – це регіон, де населення і влада дбають про збереження унікальних природних ландшафтів, ра-

ціональне використання ресурсів лісу, озер, боліт. Постійно триває робота щодо резервування особливо цінних природних комплексів та об'єктів для подальшого створення територій та об'єктів природно-заповідного фонду загальнодержавного та місцевого значення (Regional report, 2019). Науковці України, Польщі та Білорусі розробили спільну стратегію охорони і використання природної спадщини білорусько-польсько-українського прикордоння. Такою територією є Шацький національний природний парк, де постійно проводять інвентаризацію біорізноманіття. Одним із цінних об'єктів на території Шацького НПП є арборетум Шацького лісового коледжу ім. В. В. Сулька, де сьогодні формується екологічна свідомість, культура особистості студентів, гармонізація відносин у системі «людина – суспільство – природа».

Із метою систематизації дендрофлори та виявлення рідкісних рослин упродовж останніх п'яти років проводиться постійний аналіз дендрофлори, зокрема дендрораритетів на заповідних об'єктах Українського Полісся (Sotnyk, & Popovych, 2012; Popovych, Savoskina, Ustyomenko, Sherstiuk, & Dzyba, 2017; Popovych, Savoskina, Sherstiuk, Mykhailovych, & Dzyba, 2017; Pokotylova, 2018; Dzyba, Ostrovska, & Havryliuk, 2019, Pokotylova, 2020). Також досліджують ділянки активних і вироблених базальтових кар'єрів, де зростають раритетні види природної флори (Savchuk, & Vuhovskiy, 2019). Тому проведення інвентаризації дендрофлори та узагальнення результатів моніторингових спостережень (збирання, оброблення, систематизація та аналіз інформації) на території Волинського Полісся, а саме арборетуму Шацького лісового коледжу ім. В. В. Сулька є актуальним.

Мета дослідження – дослідити історію формування колекції насаджень Шацького лісового коледжу ім. В. В. Суль-

ка; встановити сучасний таксономічний склад; виокремити дендрораритети; провести аналіз біоморфологічної та екологічної структур.

Матеріали і методи дослідження. Застосовано системний підхід та порівняльний аналіз отриманого фактичного матеріалу; види деревних рослин перевіряли на належність до Червоного Списку Міжнародного Союзу Охорони Природи (ЧС МСОП) (The IUCN Red List, 2019); інвентаризацію видів деревних рослин та оцінювання їхнього стану проводили маршрутним методом (Інструкція, 2002), уточнювали вид деревних рослин за працями (Kokhno et al., 2001; Kalinichenko, 2003; Zaiachuk, 2005). Видову назву – відповідно до міжнародної класифікації (The Plant List, 2013), класифікацію життєвих форм – за (Raunkiaer, 1934), розподіл видів деревних рослин за висотами – за (Kalinichenko, 2003). Згідно з вимогами до основних факторів середовища проводили аналіз належності деревних рослин до різних екологічних груп.

Результати дослідження та їх обговорення. У селищі Шацьк у травні 1963 р. було розпочато організацію Шацького лісного технікуму (наказ № 143 Головного управління лісового господарства і лісозаготівель при Раді міністрів УРСР). Одночасно почалось формування колекції рослин. Із цією метою у 1964 р. було створено тимчасовий розсадник на території технікуму, де вирощували сіянці й саджанці для власних потреб. Насіння випишував інженер лісових культур Шацького навчально-досвідного лісгоспазу В. Г. Юрчук із ботанічних садів і дендропарків України і країн СНГ (Національний ботанічний сад ім. М. М. Гришка НАН України, Державний дендрологічний парк «Тростянець» НАН України, Державний ботанічний сад м. Каменець-Подільський, Ботанічний сад Ужгородського державного університету, Ботанічний сад Дніпровського національного

університету, Ботанічний сад Львівського національного університету імені Івана Франка, Ботанічний сад Одеського національного університету ім. І. І. Мечнікова, Національний дендрологічний парк «Софіївка», Дендрологічний сад імені Р. І. Шредера Російського державного аграрного університету-МСГА імені К. А. Тімірязева, Ботанічний сад ім. Б. М. Козо-Полянського Воронежського державного університету, Ботанічний сад-інститут Уфимського наукового центру РАН Башкирського державного університету, Тайшетське лісництво (м. Тайшет, Іркутська область), Пензенський ботанічний сад імені І. І. Спригіна, Ботанічний сад Самарського університету, Сухумський ботанічний сад Інституту Академії наук Абхазії).

Протягом 1964–1965 рр. було створено насадження навколо навчального корпусу № 1. Значну частину дерев і кущів висаджено у сквері імені Тараса Шевченка м. Шацьк (навпроти школи, де до 1970 р. розташовувався технікум). Поповнення колекції тривало; директор технікуму В. В. Сулько завозив насіння з Чехії, Німеччини, Криму та інших районів СРСР; вирощуванням посадкового матеріалу займались студенти гуртка «Лісових культур» під керівництвом В. Г. Юрчук.

У 1966–1968 рр. було виписано насіння з: Центрального ботанічного саду Національної академії наук Білорусі (21 вид), ботанічного саду Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна (13 видів), ботанічного саду Біосферного заповідника «Асканія Нова» імені Ф. Е. Фальц-Фейна (34 види), Державного дендрологічного парку «Тростянець» НАН України (43 види), Ботанічного саду Ужгородського державного університету (22 види). З метою поповнення колекції у 1968–1969 рр. Р. П. Слюсарчик і В. Г. Юрчук завезли живці та саджанці культурних троянд, *Aesculus hippocastanum* L., різні види го-

ріхів (ботанічний сад Львівського національного університету імені Івана Франка, Сторожинецький лісовий коледж), щеплені глоди, бузки, саджанці *Buxus sempervirens* L. («Брестзеленбуд»). У 1968–1970 рр. отримали насіння близько 100 видів деревних рослин із: ботанічного саду Самарського університету (19 видів), Батумського ботанічного саду (67 видів), Головного ботанічного саду ім. М. В. Цицина РАН (12 видів).

Із 1969 р. до 1970 р. було створено першу частину арборетуму на території технікуму (між Шацьким РВК і гуртожитком № 2), яка була присвячена 100-річчю від Дня народження В. І. Леніна (рис. 1). Рослини висаджували студенти під керівництвом К. С. Давидюка, В. Г. Юрчук, Є. Ф. Білецького. Було збережено дерева, що вже зростали на цій території (*Acer platanoides* L., *Fraxinus excelsior* L., два екземпляри *Pinus sylvestris* L., *Syringa vulgaris* L.). У 1970 р. – споруджено обеліск із барельєфом В. І. Леніна, де викарбовано список осіб, які зробили вагомий внесок для створення колекції рослин (К. Давидюк, В. Юрчук, П. Бандура, М. Василенко, П. Возняк, В. Герасимик, І. Головацький, І. Гривиник, С. Гриценка, М. Давидюк, В. Коваль, Г. Козюра, М. Ключук, В. Куць).

Було влаштовано такі види насаджень: солітери, групи (*Pinus banksiana* Lamb., *Pinus nigra* subsp. *pallasiana*, *Larix decidua* Mill., *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco., *Gleditsia triacanthos* L., *Castanea sativa* Mill., *Alnus incana* (L.) Moench., *Phellodendron amurense* var. *wilsonii*, *Buxus sempervirens* L., *Tamarix tetrandra* Pall., *Sorbaria sorbifolia* (L.) A.Br., *Flueggea suffruticosa* (Pall.) Baill., *Elaeagnus rhamnoides* (L.) A.Nelson., *Celtis occidentalis* L., *Ailanthus altissima* Mill., *Quercus robur* var. *fastigiata*, також різні види верб, горіхів, таволг, яблунь, жимолостей та ін.) і живоплоти (*Cornus alba* L., *Cornus sanguinea* L.).



Рис. 1. Перший етап створення арборетуму, 1970 р.

Одночасно проводили благоустрій території: встановлювали лави, залізобетонні вази-квітники, залізні скульптури (виготовлені на Венській лісосадівниці за проектами директора технікуму В. В. Сулька).

Навесні 1970 р. розширено дендропарк, розроблено проект. Технічний контроль за виконанням робіт із розміщення та висаджування деревних рослин забезпечувала комісія (В. Г. Юрчук, К. С. Давидюк, М. М. Шесюк). Планування території, влаштування доріжок та висаджування рослин проводили студенти та викладачі технікуму (М. Е. Городиський, В. О. Матлах, Е. Ф. Білецький, П. С. Данилюк, Г. Л. Токар та інші). При висаджуванні дерев і кущів використовували спеціально завезені ґрунт і торф (рис. 1), посадковий матеріал було вирощено на тимчасових розсадниках, *Ligustrum vulgare* L. (для живоплоту) та

Juniperus communis L. привезено із лісицтв. Значну увагу приділяли квітниковому оформленню території (рис. 2), з цією метою вирощували розсаду в оранжереї викладачі В. Г. Юрчук, К. С. Давидюк, Р. З. Журило зі студентами. Під керівництвом К. С. Давидюка під час навчальної практики з геодезії було проведено геодезичну зйомку території дендропарку, накреслено план.

Значну увагу приділяли хвойним деревним рослинам (за рекомендацією В. В. Сулька) (рисунки 3–7). Навесні 1975 р. під керівництвом В. Г. Юрчук і Є. Ф. Білецького в період навчальної практики було влаштовано вздовж стіни музею рядову посадку з *Thuja plicata* Donn ex D. Don. та *Thuja occidentalis* L. (рис. 5).

Головну алею перед корпусом № 1 створили зі ступінчастим поперечним перерізом, на передньому плані влашту-



а)



б)

Рис. 2. Арборетум Шацького лісового коледжу ім. В. В. Сулька, 1974 р.: а) центральна частина, б) квітникове оформлення, фото В. В. Захарко

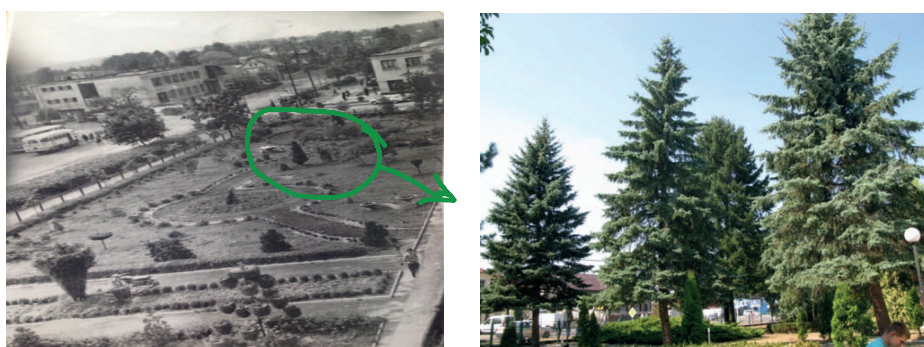


Рис. 3. Арборетум Шацького лісового коледжу ім. В. В. Сулька:
 а) планувальна структура території, 1974 р.;
 б) група з ялин, 2015 р., фото А. А. Дзиби

вали бордюру, за яким висадили власне живопліт із *Ligustrum vulgare* L., потім ряд *Thuja plicata* Donn ex D.Don. (майбутня жива стіна), за ним – рядову посадку – *Salix alba* 'Pendula', далі – ряд *Picea abies*

Karst. У 1976 р., коли *Thuja plicata* Donn ex D.Don. виросла, викорчували *Salix alba* 'Pendula', а живопліт з *Ligustrum vulgare* L. реалізували. У 2018 р. провели реконструкцію алеї (рис. 4).



Рис. 4. Алея, центральний вхід: а) 1975 р., фото В. В. Захарко; б) 1981 р., фото В. В. Захарко; в) 2015 р., фото А. А. Дзиби; г) 2020 р., фото А. А. Рибчинського

З 1968 до 1976 рр. дендропарком керувала В. Г. Юрчук, з 1976 р. – О. Г. Опанасюк, протягом 1977–1979 рр. – Г. Ф. Хотинська, у 1980 р. – В. М. Городиська, у 1981 р. – В. В. Захарко, у 1983 р. – М. С. Домарецький, а потім М. М. Турич. З 1985 р. відповідальною за дендропарк була Г. Ф. Хотинська, з 1987 р. до 1990 р. – Г. Ф. Вознюк, з 1991 р. до 1995 р. – К. С. Давидюк.

Доглядали за насадженнями дендропарку студенти під час навчальних практик (обкопування дерев, формування живоплотів, обрізування сухих гілок, водяних пагонів, корчування кореневих паростків, внесення мінеральних добрив). У 1976 р. прорідження загущених

насаджень та формування живоплотів проводив Й. Ф. Фалько.

Керівництво та викладачі коледжу (М. В. Львович, В. Г. Юрчук, К. С. Давидюк, М. М. Турич) проводили постійний моніторинг та коригування колекції насаджень. У 1979 р. було викопано сухі дерева *Betula pendula* Roth. і посаджено *Betula albosinensis* Burkill., *Syringa josikaea* Jacq., у 1981 р. навпроти гуртожитку № 1 – висаджено саджанці *Abies alba* Mill. Навесні 1983 р. – розрізано однородні групи, які розрослися (залишали по 2–3 найкращі екземпляри), обрізано сухі гілки, зрізано старі верби біля гуртожитку № 2, омолоджено живоплоти з *Lonicera tatarica* L. У 1995 р. К. С. Давидюк провів повторне омолодження кущів.



а)



б)

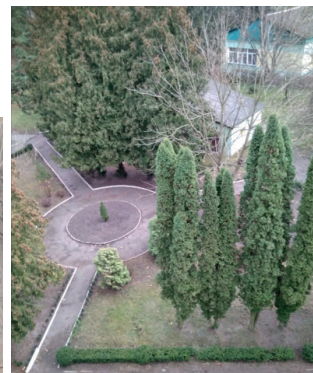
Рис. 5. Жива стіна та власне живопліт, музей «Фауни і флори»: а) 1981 р., фото В. В. Захарко; б) 2015 р., фото А. А. Дзиби



а)



б)



в)

Рис. 6. Арборетум: а) вхідна частина, 1981 р.; б) східна частина, 1981 р.; в) східна частина, 2020 р., фото А. А. Рибчинського

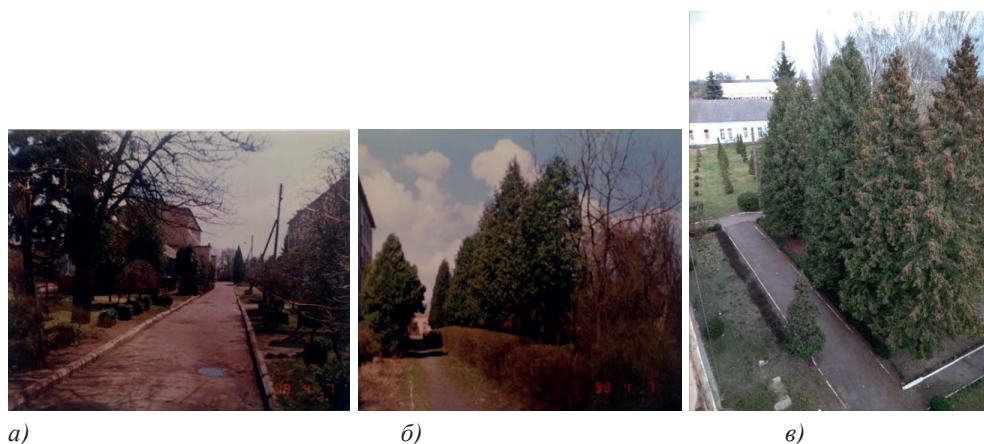


Рис. 7. Арборетум, східна частина:
 а) алея, 1998 р.; б) живопліт, алея, 1998 р.; в) живопліт, рядова посадка, 2020 р.,
 фото А. А. Рибчинського

1. Таксономічний склад деревних рослин арборетуму Шацького лісового коледжу ім. В. В. Сулька (2020 р.)

Клас	Порядок	Родина	Рід	Вид, підвид
<i>Gin-goopsida</i>	<i>Gink-goales</i>	<i>Ginkgoaceae</i>	<i>Ginkgo</i>	<i>Ginkgo biloba</i> L.
<i>Pinop-sida</i>	<i>Pinales</i>	<i>Cupresaceae</i>	<i>Thuja</i>	<i>Thuja occidentalis</i> L. <i>Thuja plicata</i> Donn ex D.Don
			<i>Platycladus</i>	<i>Platycladus orientalis</i> (L.) Franco
			<i>Juniperus</i>	<i>Juniperus communis</i> L.
				<i>Juniperus sabina</i> L.
			<i>Chamaecyparis</i>	<i>Chamaecyparis pisifera</i> Sieb. Zuss.
			<i>Metasequoia</i>	<i>Metasequoia glyptostroboides</i> Hu and W. C.Cheng
			<i>Cryptomeria</i>	<i>Cryptomeria japonica</i> (Thunb. ex L.f.) D.Don
			<i>Cupressus</i>	<i>Cupressus arizonica</i> Greene
			<i>Libocedrus</i>	<i>Libocedrus bidwillii</i> Hook.f.
		<i>Cunninghamia</i>	<i>Cunninghamia lanceolata</i> (Lamb.) Hook.	
		<i>Sciadopityaceae</i>	<i>Sciadopitys</i>	<i>Sciadopitys verticillata</i> (Thunb.) Siebold & Zucc.
		<i>Pinaceae</i>	<i>Larix</i>	<i>Larix decidua</i> Mill.
			<i>Pseudotsuga</i>	<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco
			<i>Picea</i>	<i>Picea abies</i> Karst
				<i>Picea pungens</i> Engelm
<i>Pinus</i>	<i>Pinus strobus</i> L.			
	<i>Pinus nigra</i> subsp. <i>pallasiana</i>			
	<i>Pinus sibirica</i> Du Tour,			
	<i>Pinus koraiensis</i> Siebold & Zucc			
	<i>Pinus ponderosa</i> P.Lawson & C.Lawson			
<i>Pinus banksiana</i> Lamb				

Клас	Порядок	Родина	Рід	Вид, підвид	
<i>Pinopsida</i>	<i>Pinales</i>	<i>Pinaceae</i>	<i>Pinus</i>	<i>Pinus lambertiana</i> Douglas	
				<i>Pinus sabiniana</i> Douglas	
				<i>Pinus pinea</i> L.	
			<i>Abies</i>	<i>Abies alba</i> Mill	
				<i>Abies concolor</i> (Gordon) Lindl. ex Hildebr	
				<i>Abies balsamea</i> (L.) Mill.	
			<i>Tsuga</i>	<i>Tsuga canadensis</i> (L.) Carrière	
<i>Cedrus</i>	<i>Cedrus deodara</i> (Roxb. Ex D.Don) G.Don				
<i>Taxaceae</i>	<i>Taxus</i>	<i>Taxus baccata</i> L.			
<i>Magnoliopsida</i>	<i>Fabales</i>	<i>Fabaceae</i>	<i>Amorpha</i>	<i>Amorpha fruticosa</i> L	
			<i>Gleditschia</i>	<i>Gleditsia triacanthos</i> L	
			<i>Caragana</i>	<i>Caragana arborescens</i> Lam.	
			<i>Robinia</i>	<i>Robinia pseudoacacia</i> L	
			<i>Cercis</i>	<i>Cercis siliquastrum</i> L.	
			<i>Gymnocladus</i>	<i>Gymnocladus dioica</i> (L.) K.Koch	
	<i>Ranunculales</i>	<i>Berberida-ceae</i>	<i>Berberis</i>	<i>Berberis vulgaris</i> L.	
				<i>Berberis thunbergii</i> DC.	
				<i>Berberis aquifolium</i> Pursh	
	<i>Fagales</i>	<i>Fagaceae</i>	<i>Quercus</i>	<i>Quercus robur</i> L.	
				<i>Quercus rubra</i> L.	
				<i>Castanea</i>	<i>Castanea sativa</i> Mill
		<i>Juglandaceae</i>	<i>Juglans</i>	<i>Juglans regia</i> L	
				<i>Juglans manshurica</i> Maxim	
				<i>Juglans cinerea</i> L	
		<i>Betulaceae</i>	<i>Betula</i>	<i>Betula pendula</i> Roth.	
				<i>Betula platyphylla</i> subsp. <i>kamtschatica</i> (Regel) Vorosch.	
				<i>Betula pubescens</i> Ehrh	
				<i>Alnus</i>	<i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaerth
				<i>Carpinus</i>	<i>Carpinus betulus</i> L.
				<i>Corylus</i>	<i>Corylus avellana</i> L
	<i>Lamiales</i>	<i>Oleaceae</i>	<i>Ligustrum</i>	<i>Ligustrum vulgare</i> L	
			<i>Syringa</i>	<i>Syringa vulgaris</i> L.	
				<i>Syringa josikaea</i> Jacq	
			<i>Forsythia</i>	<i>Forsythia suspensa</i> (Thunb.) Vahl	
				<i>Forsythia europaea</i>	
		<i>Fraxinus</i>	<i>Fraxinus excelsior</i> L.		
		<i>Lamiaceae</i>	<i>Lavandula</i>	<i>Lavandula angustifolia</i> Mill.	
	<i>Paulowniaceae</i>	<i>Paulownia</i>	<i>Paulownia tomentosa</i> Steud.		
	<i>Celastrales</i>	<i>Celastraceae</i>	<i>Euonymus</i>	<i>Euonymus europaea</i> L.	

Клас	Порядок	Родина	Рід	Вид, підвид	
Magnolio- psida	Dipsa- cales	Caprifo- liaceae	<i>Weigela</i>	<i>Weigela florida</i> A.DC.	
			<i>Lonicera</i>	<i>Lonicera tatarica</i> L.	
			<i>Symphoricarpos</i>	<i>Symphoricarpos albus</i> (L.) C.Koch	
	Adoxaceae	<i>Viburnum</i>		<i>Viburnum lantana</i> L.	
				<i>Viburnum opulus</i> L.	
	Cornales	Cornaceae	<i>Cornus</i>		<i>Cornus alba</i> L.
					<i>Cornus mas</i> L.
		Hydrange- aceae	<i>Deutzia</i>	<i>Deutzia scabra</i> Thunb.	
	<i>Philadelphus</i>		<i>Philadelphus coronarius</i> L.		
	Saxifrag- ales	Grossula- riaceae	<i>Ribes</i>	<i>Ribes rubrum</i> Pursh	
				<i>Ribes uva-crispa</i> L.	
	Paeonia- ceae	<i>Paeonia</i>		<i>Paeonia suffruticosa</i> Andrews	
	Rosales	Rosaceae	<i>Rosa</i>	<i>Rosa canina</i> L.	
			<i>Spiraea</i>	<i>Spiraea media</i> Schmidt	
				<i>Spiraea japonica</i> L.	
			<i>Pyrus</i>	<i>Pyrus communis</i> L.	
			<i>Sorbaria</i>	<i>Sorbaria sorbifolia</i> (L.) A.Br.	
			<i>Amelanchier</i>	<i>Amelanchier ovalis</i> Medic.	
			<i>Cotoneaster</i>	<i>Cotoneaster lucidus</i> Schlecht.	
			<i>Physocarpus</i>	<i>Physocarpus opulifolius</i> Maxim.	
			<i>Chaenomeles</i>	<i>Chaenomeles japonica</i> (Thunb.) Lindl.	
			<i>Crataegus</i>	<i>Crataegus monogyna</i> Jacq.	
				<i>Crataegus laevigata</i> (Poir.) DC.	
			<i>Sorbus</i>	<i>Sorbus aucuparia</i> L.	
				<i>Sorbus intermedia</i> (Ehrh.) Pers.	
			<i>Sorbus</i>	<i>Sorbus torminalis</i> (L.) Crantz.	
			<i>Prunus</i>	<i>Prunus tomentosa</i> (Thunb.) Wall. ex T.T. Yu & C.L. Li	
				<i>Prunus domestica</i> L.	
				<i>Prunus cerasifera</i> Ehrh.	
				<i>Prunus cerasus</i> L.	
			<i>Armeniaca</i>	<i>Armeniaca vulgaris</i> Lam.	
			<i>Malus</i>	<i>Malus sylvestris</i> Mill.	
<i>Malus baccata</i> (L.) Borkh.					
			<i>Malus toringoides</i> (Rehder) Hughes		
<i>Dasiphora</i>			<i>Dasiphora fruticosa</i> (L.) Rydb.		
<i>Exochorda</i>	<i>Exochorda racemosa</i> (Lindl.) Rehder				
Rhamna- ceae	<i>Rhamnus</i>	<i>Rhamnus cathartica</i> L.			
	<i>Frangula</i>	<i>Frangula alnus</i> Mill.			
Elaeagna- ceae	<i>Elaeagnus</i>	<i>Elaeagnus rhamnoides</i> (L.) A.Nelson			
Ulmaceae	<i>Ulmus</i>		<i>Ulmus glabra</i> Huds.		
			<i>Ulmus laevis</i> Pall.		
Moraceae	<i>Morus</i>		<i>Morus nigra</i> L.		
			<i>Morus alba</i> L.		
<i>Maclura</i>	<i>Maclura pomifera</i> (Raf.) C.K. Schneid.				

Клас	Порядок	Родина	Рід	Вид, підвид	
Magnolio- psida	Malpi- ghiales	Salicaceae	Salix	Salix fragilis L.	
			Populus	Populus alba L. Populus tremula L.	
		Phyllan- thaceae	Flueggea	Flueggea suffruticosa (Pall.) Rehd	
	Sapin- dales	Sapinda- ceae	Acer	Aesculus	Aesculus hippocastanum L.
				Acer platanoides L.	
				Acer pseudoplatanus L.	
				Acer campestre L.	
				Acer tataricum subsp. ginnala (Maxim.) Wesmael	
				Acer tataricum L.	
				Acer negundo L.	
				Acer sieboldianum Miq.	
				Acer palmatum Thunb.	
				Acer davidii Franch.	
	Acer shirasawanum Koidz.				
	Anacar- diaceae	Rhus	Rhus typhina L.		
		Cotinus	Cotinus coggygia Scop.		
	Rutaceae	Ptelea	Ptelea trifoliata L.		
		Phellodendron	Phellodendron amurense var. wilsonii.		
	Malvales	Malvaceae	Tilia	Tilia cordata Mill	
	Proteales	Platana- ceae	Platanus	Platanus orientalis L.	
	Buxales	Buxaceae	Buxus	Buxus sempervirens L.	
	Vitales	Vitaceae	Parthenocissus	Parthenocissus quinquefolia Planch	
	Magno- liales	Magnolia- ceae	Magnolia	Magnolia stellata (Siebold & Zucc.) Maxim.	
				Magnolia macrophylla Michx. i	
				Magnolia grandiflora L.	
				Magnolia virginiana L.	
				Magnolia sieboldii K. Koch	
Magnolia sprengeri Pamp.					
Magnolia tripetala (L.) L.					
Magnolia kobus					
Liriodendron			Liriodendron tulipifera L.		
Annona- ceae	Asimina	Asimina triloba (L.) Dunal			
Apiales	Araliaceae	Aralia	Aralia elata (Miq.) Seem.		
		Hedera	Hedera helix L.		
Scrophu- lariales	Bignonia- ceae	Catalpa	Catalpa bignonioides Walter		
Ericales	Ericaceae	Vaccinium	Vaccinium corymbosum L.		
Theales	Actinidia- ceae	Actinidia	Actinidia kolomikta (Rupr. & Maxim.) Maxim.		
Crossoso- matales	Staph- yleaceae	Staphylea	Staphylea pinnata L.		

2. Співвідношення таксонів *Pinophyta* і *Magnoliophyta* дендрофлори арборетуму Шацького лісового коледжу ім. В. В. Сулька

Відділ	Родина		Рід		Вид	
	кількість	%	кількість	%	кількість	%
<i>Pinophyta</i>	5	12,2	19	20,2	32	21,8
<i>Magnoliophyta</i>	36	87,8	75	79,8	115	78,2
Усього	41	100	94	100	147	100

З 1998-го до 2001 р. догляд за дендропарком і теплицею проводила О. М. Турич. У цей період було продовжено живцювання цінних деревних рослин (*Thuja occidentalis* L. та культивари, *Thuja plicata* Donn ex D. Don., *Buxus sempervirens* L., *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco., *Forsythia europaea*, *Metasequoia glyptostroboides* Hu and W. C. Cheng., *Juniperus sabina* L.) для подальшого озеленення і поновлення колекції дендропарку, а також для закладання шкільки на розсаднику, вирощування розсади квітів. Поповнено колекцію рослин. Створено клумбу зі 150 екземплярів різних сортів троянд. Продовжено влаштування живої огорожі з *Thuja occidentalis* L. уздовж доріжки в напрямку до спортивного майданчика. Викорчовано *Salix alba* L. (мали неестетичний вигляд), замість них влаштовано рядову посадку з *Aesculus hippocastanum* L. та *Sorbus intermedia* (Ehrh.) Pers.

Із 2017 р. до 2020 р. А. А. Рибчинський поповнив колекцію деревних рослин дендропарку 29 видами: *Magnolia stellata* (Siebold & Zucc.) Maxim., *Magnolia macrophylla* Michx., *Magnolia grandiflora* L., *Magnolia virginiana* L., *Magnolia sieboldii* K. Koch., *Magnolia sprengeri* Pamp., *Magnolia tripetala* (L.) L., *Liriodendron tulipifera* L., *Asimina triloba* (L.) Dunal., *Aralia elata* (Miq.) Seem., *Exochorda racemosa* (Lindl.) Rehder., *Paulownia tomentosa* Steud., *Lavandula angustifolia* Mill., *Cercis siliquastrum* L., *Cedrus deodara* (Roxb. Ex D. Don) G. Don., *Pinus pinea* L., *Pinus sabiniana* Douglas., *Pinus lambertiana* Douglas., *Pinus banksiana* Lamb., *Pinus ponderosa* P. Lawson & C. Lawson; *Pinus*

strobus L., *Sciadopitys verticillate* (Thunb.) Siebold & Zucc., *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook., *Libocedrus bidwillii* Hook. f., *Ginkgo biloba* L., *Acer shirasawanum* Koidz., *Acer davidii* Franch., *Acer palmatum* Thunb., *Acer sieboldianum* Miq.

Дендрофлора арборетуму налічує 147 видів (109 рідкісних), які належать до 94 родів, 41 родини, 23 порядків, двох класів (табл. 1). Більшість видів належить до відділу *Magnoliophyta* – 115 видів (78,2 %), до *Pinophyta* – 32 види (21,8 % загальної кількості видів) (табл. 2).

Відповідно до класифікації життєвих форм Раункієра, 144 види деревних рослин належать до фанерофітів (рис. 8), переважають мезофанерофіти (38,9 %) (мегафанерофітів – 24,3 %, мікрофанерофітів – 26,4 %, нанофанерофітів – 10,4 %) та три види хамефітів (рис. 8).

Розподіл досліджуваних деревних рослин за висотами показав, що 48 видів – дерева першої величини (більше ніж 25 м): *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco., *Picea pungens* Engelm., *Pinus strobus* L., *Abies alba* Mill., *Quercus robur* L., *Quercus rubra* L., *Fagus sylvatica* L. та ін., вісім видів дерев другої величини (від 15 до 25 м) – *Carpinus betulus* L., *Paulownia tomentosa* Steud., *Phellodendron amurense* var. *wilsonii*, *Pinus banksiana* Lamb. та ін., дев'ять видів дерев третьої величини – *Taxus baccata* L., *Pinus sabiniana* Douglas., *Magnolia sprengeri* Pamp. та ін., 34 види дерев четвертої величини – *Prunus domestica* L., *Malus sylvestris* Mill., *Malus totingoides* (Rehder) Hughes., *Morus nigra* L., *Morus alba* L. та ін., кущів високих – 23 види, кущів середніх – 20 видів, три види ліан і один напівчагарник (рис. 9).

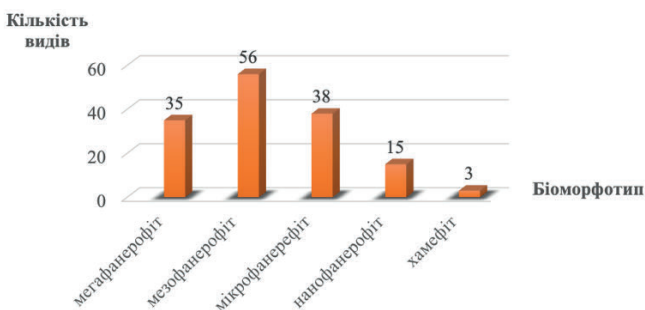


Рис. 8. Біоморфний спектр дендрофлори

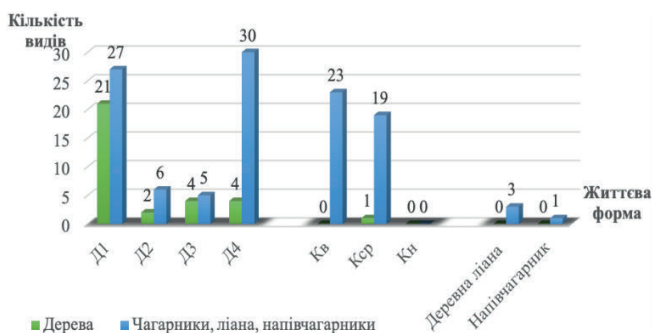


Рис. 9. Розподіл видів деревних рослин за висотою

Проведено розподіл дендрофлори арборетуму за такими показниками: родючістю ґрунту, вимогливістю до ґрунтової вологи, освітлення. Виявлено, що поширені мезотрофи – 72 види (49,0 % загальної кількості видів); дещо менше оліготрофів – 41 вид (27,9 %, *Picea pungens* Engelm., *Pinus banksiana* Lamb., *Platycladus orientalis* (L.) Franco., *Pinus nigra* subsp. *pallasiana*, *Pinus strobus* L., *Juniperus communis* L. та ін.) і мегатрофів – 30 видів (20,4 %, *Sciadopitys verticillata* (Thunb.) Siebold & Zucc., *Abies alba* Mill., *Abies balsamea* (L.) Mill., *Pinus koraiensis* Siebold & Zucc., *Chamaecyparis pisifera* (Siebold & Zucc.) Endl., *Thuja plicata* D. Don. та ін.). Найменше представлені мезооліготрофи – чотири види (2,7 %), а саме: *Pinus ponderosa* P.Lawson & C.Lawson., *Gymnocladus dioica* (L.) K.Koch., *Acer tataricum* L., *Acer negundo* L. (рис. 10).

Спектр видів деревних рослин арборетуму має сім типів гігоморф: гігрофіти,

гігромезофіти, мезогігрофіти, мезофіти, мезоксерофіти, ксеромезофіти, ксерофіти. Поширеними є дві групи: мезофіти – 57 видів (38,8 %) і ксеромезофіти – 25 видів (17,0 %). Малопоширеними є гігромезофіти – чотири види (2,7 %), до них належать – *Salix fragilis* L., *Ulmus glabra* Huds., *Acer tataricum* subsp. *ginnala* (Maxim.) Wesmael., *Acer negundo* L. Майже однаковою кількістю представлені гігрофіти (16 видів, 10,9 %), ксерофіти (16 видів, 10,9 %) та мезогігрофіти (18 видів, 12,2 %). Мезоксерофітів є 11 видів (7,5 %, (*Exochorda racemosa* (Lindl.) Rehder., *Armeniaca vulgaris* Lam., *Crataegus laevigata* (Poir.) DC., *Paulownia tomentosa* Steud., *Lavandula angustifolia* Mill., *Betula pendula* Roth., *Berberis aquifolium* Pursh., *Robinia pseudoacacia* L. та ін.) (рис. 11).

Аналіз за вимогливістю до світла засвідчив найбільші дві групи: геміскіофіти – 65 видів (44,2 %, *Abies concolor* (Gordon) Lindl. ex Hildebr., *Picea abies*

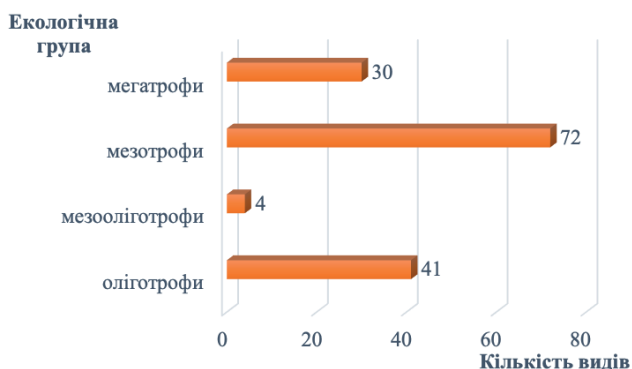


Рис. 10. Екологічна структура видів деревних рослин (трофність)

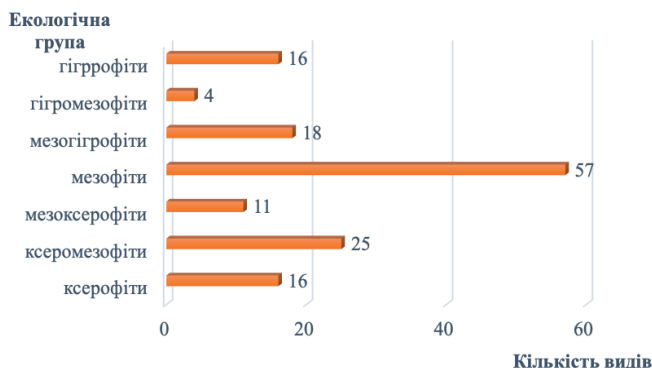


Рис. 11. Екологічна структура видів деревних рослин (вологість)

(L.) H.Karst., *Pinus koraiensis* Siebold et Zucc., *Pinus nigra* subsp. *pallasiana*, *Pinus sibirica* (Rupr.) Mayr., *Chamaecyparis pisifera* (Siebold & Zucc.) Endl.) та геліофіти – 62 видів (44,2%), *Pinus banksiana* Lamb., *Pinus lambertiana* Douglas., *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, *Pinus strobus* L., *Metasequoia glyptostroboides* Hu&W.C. Cheng., *Gleditsia triacanthos* L., *Cercis siliquastrum* L. та ін.), значно менше представлені скіофіти – 20 видів (13,6%) (рис. 12).

Важливим показником життєздатності рослин є їхній якісний стан. На сучасний стан дендрораритетів впливають різні чинники: низька температура взимку, недостатня кількість опадів улітку. Окремі екземпляри *Quercus robur* L., *Populus alba* L., *Populus tremula* L., *Betula*

pendula Roth. уражені *Viscum album* L., деякі екземпляри *Pinus koraiensis* Siebold & Zucc. – пошкоджені *Ips acuminatus*. Серед досліджених деревних рослин – 139 видів мають добрий стан, чотири види – задовільний (*Quercus robur* L., *Populus alba* L., *Populus tremula* L., *Betula pendula* Roth.), чотири види – незадовільний стан (*Juglans manshurica* Maxim, *Juglans cinerea* L., *Juglans nigra* L., *Pinus koraiensis* Siebold & Zucc.), деревні рослини, що мають незадовільний стан, замінюють новими.

Висновки і перспективи. У арборетумі Шацького лісового коледжу ім. В. В. Сульки за перше десятиріччя було висаджено 220 видів деревних рослин, що були вирощені переважно із насіння, отриманого із 16 ботанічних садів, трьох

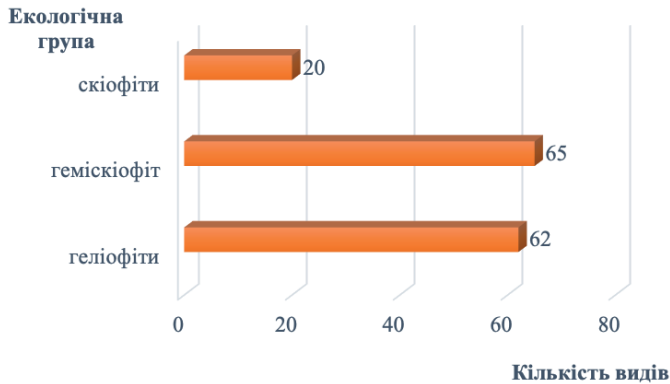


Рис. 12. Екологічна структура видів деревних рослин (світло)

дендропарків, одного лісництва та зеленого господарства України та інших країн СНД. Розробку проекту, планування, влаштування, благоустрій території та догляд проводили студенти коледжу під керівництвом директора та викладачів. Планувальна структура арборетуму – осьова. У дендропарку представлені такі види насаджень: групи, алеї, живоплоти, живі стіни, солітери.

Частина видів деревних рослин упродовж 50 років загинула. У 2015 р. кількість видів становила 118, за останні три роки колекція поповнилась на 29 рідкісних видів деревних рослин. Станом на 2020 р. дендрофлора арборетуму налічує 147 видів (109 рідкісних), що належать до 94 родів, 41 родини, 23 порядків, двох класів. Відділ *Magnoliophyta* представлено 115 видами (78,2 %), *Pinophyta* – 32 види (21,8 %). 144 види деревних рослин – фанерофі-

ти (мезофанерофіти – 38,9 %, мегафанерофіти – 24,3 %, мікрофанерофіти – 26,4 %, нанофанерофітів – 10,4 %), три види – хамефіти.

Екологічна структура представлена переважно геміскіофітами – 65 видів (44,2 %) та геліофітами – 62 види (44,2 %). За вимогливістю рослин до родючості ґрунту переважають мезотрофи – 72 види, малопоширеними є мезооліготрофи – 2,7 %. Спектр видів деревних рослин арборетуму має шість типів гігоморф, поширеними є мезофіти (57 видів) і ксеромезофіти (25 видів), малопоширеними – гігомезофіти (чотири види, 2,7 %). У 95 % деревних рослин – добрий стан, по чотири види мають задовільний і незадовільний стан.

На основі проведеного дослідження пропонуємо і надалі поповнювати колекцію рослин, проводити догляд і надати арборетуму охоронного статусу.

Список літератури

- Dzyba, A., Ostrovska, V., & Havryliuk, M. (2019). Rare species of woody plants of Pinophyta Division in Berezne Dendrological Park (taxonomic composition, state, ecological and biomorphological structures). *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 10 (4), 81–91. <http://doi.org/10.31548/forest2019.04.081> [in Ukrainian].
- Instruction on inventory of green spaces in settlements of Ukraine. Available at <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/z0182-02> [in Ukrainian].
- Kalinichenko, O. A. (2003). *Decorative dendrology*. Kyiv: Higher School [in Ukrainian].
- Kokhno, M. A., Hordiienko, V. I., Zakharenko, H. S., Kolesnichenko, O. M., Kuznetsov, S. I., Lohhinov, V. B., & Chupryna, P. Y. (2001). *The dendroflora of Ukraine. Wild and cultivated trees and shrubs. Gymnospermae*. Kyiv: Higher school [in Ukrainian].

- Pokotylova, K. H. (2018). Systematic and Biomorphological Analysis of Dendroflora of Artificial Protected Parks of the Rivne Region. *Lesya Ukrainka Eastern European National University Scientific Bulletin. Series: Biological Sciences*, 8 (381), 17–22. <https://doi.org/10.29038/2617-4723-2018-381-17-22> [in Ukrainian].
- Pokotylova, K. H. (2020). Representativity of Rivne region artificial protected parks dendroflora. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 11 (1), 98–107. <https://doi.org/10.31548/forest2020.01.098> [in Ukrainian].
- Popovych, S. Y., Savoskina, A. M., Sherstiuik, M. Y., Mykhailovych, N. M., & Dzyba, A. A. (2017). *The reserved dendrosozoflora of the Ukrainian Polissya*. Kyiv: Ltd. "CP «Komprint»" [in Ukraine].
- Popovych, S. Y., Savoskina, A. M., Ustymenko, P. M., Sherstiuik, M. Y., & Dzyba, A. A. (2017). *The dendrosozological catalogue of the natural-reserved fund of the Ukrainian Polissya*. Kyiv: Ltd. "CP «Komprint»" [in Ukrainian].
- Raunkiaer, C. (1934). *The life forms of plants and statistical plant geography*. Oxford: Clarendon Press.
- Regional report on the state of the environment in the Volyn region for 2019. Available at <https://mer.gov.ua/files/docs/Reg.report/2019/Волинська%20область.pdf> [in Ukrainian].
- Savchuk, L., & Vyhovskiy, I. (2019). Rare species of plants in the floristic composition of basalt quarries of Volyn Polissya. *Scientific Issue Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University. Series: Biology*, 76, 8–13. <https://doi.org/10.25128/2078-2357.19.2.1> [in Ukrainian].
- Sotnyk, L. P., & Popovych, S. Y. (2012). *Forest vegetation of the Shatsky Biosphere Reserve*. Kyiv: Ltd. "CP «Komprint»" [in Ukrainian].
- The IUCN Red List of Threatened Species, 2019, Version 3.1. Available at <https://www.iucnredlist.org>.
- The Plant List, 2013, Version 1.1. Available at <http://www.theplantlist.org/1.1/browse/G/>.
- Zaiachuk, V. Y. (2005). *Dendrology. Gymnospermae: Tutorial*. Lviv: Ltd. "Firma Kamula" [in Ukrainian].

Dzyba, A. A., Rybchynska, N. P., Rybchynskiy, A. A. (2020). History of formation, taxonomic composition, biomorphological and ecological structure of the arboretum of Shatsk forest college named after V. V. Sulka. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 11 (3), 62–76. <https://doi.org/10.31548/forest2020.03.007>

Arboretum of Shatsk Forest College named after V. V. Sulka, a valuable center of dendroflora for conservation and enrichment of biodiversity of Volyn Polissya, occupies an area of 1.5 hectares. The history of the formation of the arboretum of Shatsk Forest College named after V. V. Sulka from its creation to the present days (for 50 years) is given. The results of the arboretum dendroflora inventory are presented, with 147 species (109 rare species) belonging to 94 genera, 41 families, 23 orders, two classes. Most species belong to the Magnoliophyta division – 115 species (78.2 %), whereas to Pinophyta division – 32 species (21.8 %). Plants grow in the following plantings: groups, alleys, hedges, living walls, solitaires, and common mixed groups. 144 species of woody plants belong to phanerophytes, with mesophanerophytes (38.9 %) (megaphanerophytes – 24.3 %, microphanerophytes – 26.4 %, nanophanerophytes – 10.4 %) and 3 species of hamephytes predominating.

An analysis of the ecological structure (in relation to: light demand, demand for moisture level, and demand for soil fertility) is given. The ecological structure is mostly represented by hemiskophytes – 65 species (44.2 %) and heliophytes – 62 species (44.2 %), while sciophytes – 20 species (13.6 %) are significantly less represented. In relation to soil fertility demand, the following were identified: mesotrophs – 72 species (49.0% of the total number of species); slightly less oligotrophs (27.9 %) and megatrophs (20.4 %), and mesooligotrophs, which are the least represented – 2.7%. The range of woody plants species of arboretum consists of six types of hygromorphs, with mesophytes – 57 species and xeromesophytes – 25 species being the most common, whereas hygromesophytes – 4 species (2.7 %) belong to less common. Almost by the same quantity hygrophytes (16 species, 10.9 %), xerophytes (16 species, 10.9 %), mesohygrophytes (18 species, 12.2 %), and mesoxerophytes (11 species, 7.5 %) are represented.

The current state of woody plants was evaluated. 95 % of woody plants are in good condition, with four species having satisfactory and four species – unsatisfactory condition.

Key words: arboretum, rare tree species, Shatsk, ecology, taxonomic composition, creation, reconstruction.

Отримано: 2020-08-08

ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ЗАПАЛЮВАННЯ ДЕРЕВНОЇ СИРОВИНИ ЗА ДІЇ ВИСОКОЇ ТЕМПЕРАТУРИ РАДІАЦІЙНОЇ ПАНЕЛІ

В. В. ЛОМАГА, аспірант*

<https://orcid.org/0000-0002-0569-9987>, e-mail: lomaga39@gmail.com

О. Ю. ЦАПКО, аспірант**

<https://orcid.org/0000-0003-2298-068X>, e-mail: alekseytsapko@gmail.com

Ю. В. ЦАПКО, доктор технічних наук, старший науковий співробітник

<https://orcid.org/0000-0003-0625-0783>, e-mail: jurytys@ukr.net

Національний університет біоресурсів і природокористування України

О. П. БОНДАРЕНКО, кандидат технічних наук, доцент

<https://orcid.org/0000-0002-8164-6473>, e-mail: bondolya3@gmail.com

Київський національний університет будівництва і архітектури

Зниження пожежної небезпеки будівельної деревини є завданням не лише економічним, воно має також соціальну та екологічну спрямованість. Важливою проблемою забезпечення життєдіяльності та безпечного функціонування об'єктів будівництва є розроблення, з економічного, технологічного та екологічного поглядів, вогнезахисних покриттів для будівельних дерев'яних конструкцій. У будівництві все більш інтенсивно ведеться пошук нових високоефективних засобів вогнезахисту деревини та виробів із неї, який має не тільки забезпечувати нормовану вогнестійкість деревини, а й зберігати її експлуатаційні параметри, гарантувати екологічну безпеку і довговічність. Проведеними дослідженнями впливу радіаційної панелі на займання зразка деревини встановлено параметри часу запалювання деревного матеріалу, а оброблення вогнезахисними засобами дає можливість впливати на цей процес. Доведено, що нанесення на поверхню деревини вогнезахисного покриття створює на поверхні органічного матеріалу шар, який передбачає нагрівання до критичної температури, коли починається інтенсивний розклад матеріалу з виділенням необхідної кількості горючих газів та їх займання. Завдяки цьому можливо визначити вплив вогнезахисту та властивостей захисних композицій на процес гальмування швидкості вигорання деревини. Експериментальними дослідженнями підтверджено, що необроблений зразок деревини під термічною дією радіаційної панелі зайнявся, полум'я поширилося всією поверхнею, що призвело до його згоряння. Застосування вогнезахисного лаку під дією температурного впливу приводить до утворення шару пінококсу та гальмування теплопередачі високотемпературного полум'я до матеріалу і його загорання. Завдяки цьому стало можливим визначити умови зміни параметрів горіння та гальмування при вогнезахисті деревини, шляхом утворення бар'єра для теплопровідності. Отже, є підстави стверджувати про можливість спрямованого регулювання процесів вогнезахисту деревини шляхом застосування вогнезахисних покриттів, здатних утворювати на поверхні матеріалу захисний шар, який гальмує швидкість вигорання деревини.

Ключові слова: захисні засоби, займання, оброблення поверхні, швидкість вигорання деревини, ефективність захисту.

* Науковий керівник – доктор технічних наук, професор Ю. В. Цапко.

** Науковий керівник – доктор технічних наук, професор О. О. Пінчевська.

Актуальність та аналіз останніх досліджень. Деревина, як будівельний матеріал, широко застосовується у будівництві й архітектурі завдяки своїм механічним та експлуатаційним властивостям, але через підвищену горючість є пожежонебезпечним матеріалом. Підвищити рівень пожежної безпеки об'єктів, де використовують будівельні конструкції з деревини, можливо за допомогою її вогнезахисного оброблення, суть якого полягає в наданні деревині здатності протистояти дії полум'я, поширенню полум'я поверхнею, у запобіганні вільному доступу кисню, який сприяє деструкції деревини і прискоренню процесу горіння. Відомо, що деревина не здатна до полуменевого горіння сама по собі, лише під дією температури горять продукти її розкладу. Введення в матеріал антипіренів зменшує кількість утворення горючих летких продуктів і запобігає їх займанню, інгібує газофазні реакції полум'я, унеможливує безполуменево горіння карбонізованого залишку та знижує швидкість втрати маси.

Процес горіння складається з таких стадій: 1) підсушування і нагрівання до температури початку виходу летючих речовин; 2) займання летючих речовин і їх вигорання; 3) нагрівання коксу до займання; 4) вигорання горючих речовин із коксу. На практиці ці стадії частково накладаються одна на одну, як зауважує Tsapko (2019). В роботі Gaff & Kačík (2019) досліджено вплив термічної модифікації, а також вогнезахисної здатності, виявлено за такими характеристиками горіння, як втрата ваги, швидкість горіння, максимальна швидкість горіння, але не вказано хімічні зміни, спричинені впливом цих факторів. Матеріали, які наведено у роботі Zhao & Guo (2018), характеризуються високою вогневою стійкістю, але не показано механізм утворення коксу та температурні переходи за термічної дії.

Ефективність застосування компонентів покриття на основі органічних речо-

вин показано в роботі Cirić & Wang (2016), де за рахунок дії антипіренів на основі поліфосфорних кислот і спінювачів можливо значно впливати на формування захисного шару пінококсу. Однак постає необхідність дослідження умов утворення бар'єра для теплопровідності та встановлення ефективної дії покриття з утворенням шару коксу. Значне підвищення стійкості, щільності і міцності захисного шару досягається внаслідок направлено формування тих чи тих добавок, які утворюють високотемпературні сполуки (Carosio, 2016). Однак для підтвердження цього процесу не наведено відповідні фізико-хімічні розрахунки.

Крім того, багато покриттів мають низку недоліків, як-от нанесення окремих компонентів, втрати функціональних властивостей за збільшення температури середовища (Nasir, & Ramli Sulong, 2018). Тобто не визначено, як саме перебігає процес за умов температур у діапазоні розкладу вогнезахисного покриття. Проведено також дослідження захисних матеріалів, виготовлених із органічних речовин із розчином із колеманітової руди (Erdoğan, 2016). Показано, що завдяки встановленим співвідношенням стає можливим корегування вмісту компонентів для забезпечення процесу теплостійкості, однак не завжди неармовані склади забезпечують ефективний опір полум'я за зміни температури. Як результат, проходив процес горіння з інтенсивною втраченою маси, і вирішення цього питання потребує розроблення нових підходів. Це й зумовило необхідність проведення досліджень у цьому напрямку.

Мета дослідження – виявлення закономірностей займання зразків деревини та встановлення часових параметрів процесу загорання при вогнезахисті.

Для досягнення мети вирішували такі завдання:

- встановити особливості загорання деревини за температурного впливу на зразок радіаційної панелі;



Рис. 1. Модельні зразки деревини для випробувань

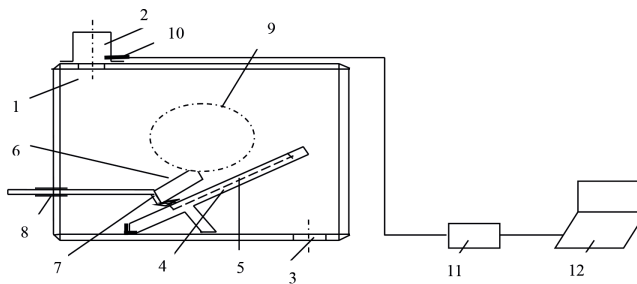


Рис. 2. Випробувальна камера для визначення параметрів займання та поширення полум'я: 1 – випробувальна камера, 2 – витяжна труба, 3 – вентиляційний отвір, 4 – тримач зразка, 5 – зразок, 6 – радіаційна панель, 7 – запалювальний пристрій, 8 – регулювальна труба, 9 – оглядове скло, 10 – термопара, 11 – аналого-цифровий перетворювач, 12 – комп'ютер

– дослідити процес пригнічення швидкості загорання деревини при застосуванні захисних композицій.

Матеріали і методи дослідження. Для встановлення горючості деревини використовували зразки прямошарової деревини сосни розміром (Д×Ш×Т) 320×140×6 мм, щільністю 450÷470 кг/м³, які обробляли спучувальним вогнезахисним лаком (СВЛ) (рис. 1). в кількості по два зразки обробленої СВЛ і необробленої деревини, що зумовлено методикою дослідження.

Спучувальний вогнезахисний лак (СВЛ) пошарово наносили на поверхню зразків деревини з витратою вогнезахисного покриття у кількості 270 г/м². Після сушіння до постійної маси проводили випробування, як оброблених, так і необроблених зразків деревини. Дослідження з визначення часу запалювання деревної сировини проводили з застосуванням

пристрою (рис. 2), висвітлено у статті (Tsapko, & Tsapko, (2018).

Суть методики випробувань полягала у впливі на зразок радіаційної панелі та його запалювання, вимірюванні температури продуктів горіння та часу її досягнення, часу займання зразка (рис. 2).

Моделювання процесу запалювання деревинної сировини. У загальному вигляді математична модель займання деревини описується системою рівнянь Tsapko & Sokolenko (2005):

$$\left. \begin{aligned} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} &= \rho \frac{\partial q}{\partial t} + \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\eta}{x} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial q}{\partial t} &= k_0 \cdot C_i^{\mu} \cdot Q \cdot \left(1 - \frac{q}{Q} \right)^{\nu} \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T}} \\ T(x,0) &= T_i; \quad q(x,0) = 0; \\ \left. \begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} &= 0; \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=H} = \alpha \cdot (T - T_i) \end{aligned} \right\} \quad (1) \end{aligned}$$

де ρ – щільність матеріалу, кг/м³;

c_p – теплоємність матеріалу, Дж(кг·К);
 T – температура матеріалу, К;
 t – час, від моменту надходження матеріалу в камеру, с;

$q-i$ – частина теплоти реакції окислювання, що витрачається на згорання матеріалу (глибина проникнення реакції), що залежить від швидкості вигорання матеріалу, Дж/кг;

λ – теплопровідність матеріалу, Вт(м·К);

x – просторова координата, відлічувана від геометричного центра об'єму матеріалу до поверхні розподілу з навколишнім середовищем, м;

η – коефіцієнт форми об'єму: плоско-паралельна ($\eta = 0$), циліндрична ($\eta = 1$), сферична ($\eta = 2$);

k_0 – передекспоненціальний множник реакції окислювання 1/с;

C_0 – об'ємна частка кисню у навколишнім середовищі;

μ – порядок реакції за киснем;

Q – тепловий ефект реакції окислювання, Дж/кг;

ν – порядок реакції;

E – енергія активації, Дж/моль;

R – універсальна газова стала, $R = 8,2314$ Дж (мольК);

T_n – початкова температура матеріалу, К;

L – характерний лінійний розмір об'єму матеріалу, м;

α – коефіцієнт теплообміну між поверхнею матеріалу й навколишнім середовищем, Вт/(м²·К);

T_0 – температура навколишнього середовища, К.

Для вирішення системи (1) введено безрозмірні змінні та параметри:

$$\theta = E(T - T_0) / (R \cdot T_s^2), \quad \xi = \frac{x}{x^*}, \quad \tau = \frac{t}{t^*},$$

$$A = E(T_s - T_0) / (R \cdot T_s^2), \quad \varepsilon = e^{-A}, \quad (2)$$

де
$$x^* = \frac{1}{\sqrt{\frac{Q \cdot E \cdot k_0}{\lambda \cdot R \cdot T_s^2} \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T_s}}}}, \quad t^* = \frac{c\rho \cdot R T_s^2}{Q \cdot E \cdot k_0} e^{-\frac{E}{R \cdot T_s}}.$$

Тоді система (1) набуває такого типу з початковими і граничними умовами: при $0 < \xi < \infty, 0 < \tau < \infty,$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi^2} + \varepsilon \cdot (e^\theta - 1) = 0, \quad (3)$$

з граничними умовами:

$$\Theta|_{\xi=0} = A = \text{const}, \quad \Theta|_{\xi=\infty} = 0, \quad \Theta|_{\tau=0} = 0, \quad (4)$$

Використовуючи метод Јанна (2010), можна (3) представити як прогрів напів-обмеженої області зі змінними фізичними параметрами:

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - \alpha(x, t) \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \beta(x, t) \frac{\partial}{\partial x} + \gamma(x, t) \right] T = 0, \quad (5)$$

і приймаючи значення:

$$\alpha = 1, \quad \beta = 0, \quad \gamma = -\varepsilon(e^\theta - 1) / \Theta, \quad (6)$$

Зв'язок безрозмірної температури $\Theta_s = A$ і її похідної $q_s = \Theta'|_{\xi=0}$, біля поверхні рішення системи (3) наведено у вигляді ряду по степені параметра ε :

$$q_s(\tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon^n \cdot q_n(\tau), \quad (7)$$

Найдені рекурентні співвідношення, що послідовно визначають значення q_n у вигляді рівняння Churikov (2010):

$$q_s = -\frac{A}{\sqrt{\pi \cdot \tau}} + \frac{\sqrt{\pi \cdot \tau}}{A} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\sqrt{\pi \cdot \tau}}{A} \right)^3 + \left(\frac{\sqrt{\pi \cdot \tau}}{A} \right)^5 \right]. \quad (8)$$

Звідси, використовуючи перетворення Rubtsov & Seplyarskiy (2019), знаходимо час займання за умови $q_s = 0$:

$$\tau = 0,2068 \cdot A^2. \quad (9)$$

Відповідно час займання деревини становитиме:

$$t = \frac{c\rho \cdot R T_s^2}{Q \cdot E \cdot k_0} e^{-\frac{E}{R \cdot T_s}} \cdot \tau. \quad (10)$$

Результати дослідження та їх обговорення. На рис. 3 наведено результати визначення параметрів займистості деревини за заданих рівнях впливу на поверхню зразків теплового потоку та полум'я від джерела запалювання.

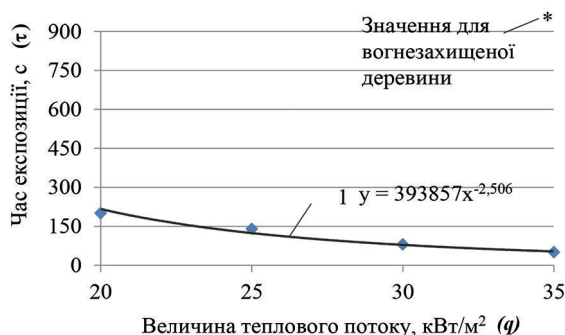


Рис. 3. Залежність часу спалахування τ від поверхневої густини теплового потоку q : 1 – необроблений зразок деревини

Встановлено, що під час дії теплового потоку з критичною поверхневою густиною 20 кВт/м^2 , що відповідає значенню температури на поверхні деревини 230°C , відбувалось займання необроблених зразків деревини протягом 204 с. Зі збільшенням значення теплового потоку час спалахування зменшується (крива 1 на рис. 3). Займання захищених СВЛ зразків деревини за значення поверхневої густини теплового потоку 35 кВт/м^2 протягом 600 с не відбувалось.

У результаті проведених досліджень Тсарко (2011) встановлено, що температура розкладу деревини починається за температури понад $220\div 235^\circ\text{C}$. Енергія активації при розкладу деревини становить близько $44,230 \text{ кДж/моль}$.

Застосування вогнезахисту на основі спучувального покриття призводить до утворення теплоізоляційного шару пінококсу за температури, нижчої від температури розкладу деревини, а значення енергії активації відповідає значенню $21,87 \text{ кДж/моль}$, як зауважує Тсарко (2019).

Розрахований за рівнянням (10) час займання деревини при дії теплового потоку в 20 кВт/м^2 становитиме 233 с, натомість для вогнезахисної деревини за рахунок утворення теплоізоляційного шару пінококсу час займання зміщується у великі часові терміни.

Із метою встановлення відповідності вогнезахисних властивостей деревини,

обробленої СВЛ, проведено експериментальні дослідження для визначення групи горючості деревини необробленої та вогнезахисної спучувальним лаком (рис. 4).

Суть методу випробувань експериментального визначення групи важкогорючих і горючих твердих речовин і матеріалів полягає у впливі на зразок, розташований у керамічній трубі установки ОТМ, полум'я пальника з заданими параметрами (температура газоподібних продуктів горіння на виході з керамічної труби становить $200^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$). Під час проведення експериментальних досліджень фіксують максимальний приріст температури газоподібних продуктів горіння (Δt) та втрату маси зразка (Δm).

Максимальний приріст температури (Δt_{max}) розраховують за формулою:

$$\Delta t_{\text{max}} = t_{\text{max}} - t_0, \quad (11)$$

де t_{max} – максимальна температура газоподібних продуктів горіння матеріалу, який досліджується, $^\circ\text{C}$;

t_0 – початкова температура (200°C).

Втрату маси зразка (Δm) у відсотках розраховують за формулою:

$$\Delta m = \frac{m_{\text{н}} - m_{\text{к}}}{m_{\text{н}}} \cdot 100, \quad (12)$$

де $m_{\text{н}}$ – маса зразка до випробувань, г;
 $m_{\text{к}}$ – маса зразка після випробувань, г.

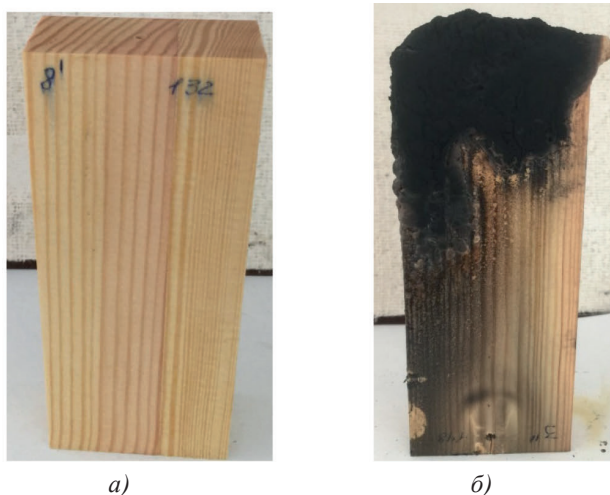


Рис. 4. Модельні зразки вогнезахисленої деревини:
а – до випробувань, б – після випробувань

За результатами випробувань матеріали класифікують як:

важкогорючі – $\Delta t < 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $\Delta m < 60\%$;
горючі – $\Delta t \geq 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ чи $\Delta m \geq 60\%$.

Горючі матеріали поділяють залежності від часу (τ) досягнення максимальної температури газоподібних продуктів горіння на:

важкозаймисті – $\tau > 240\text{ с}$;
середньої займистості – $30\text{ с} \leq \tau \leq 240\text{ с}$;
легкозаймисті – $\tau < 30\text{ с}$.

Результати досліджень із визначення втрати маси зразків та температури димових газів необробленої деревини та вогнезахисленої спучувальним лаком наведено на рисунках 5 і 6.

Результати досліджень (рис. 5) із визначення ефективності вогнезахисту деревини показали незначну втрату маси для вогнезахисленої деревини та незначну динаміку наростання температури димових газів, порівняно з деревиною без вогнезахисту.

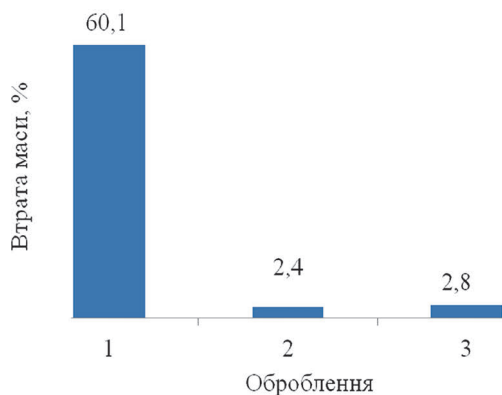


Рис. 5. Втрата маси зразків (Δm , %) при випробуваннях: зразків необробленої деревини (1), вогнезахисленої спучувальним лаком (2) та з додаванням загусника (3)

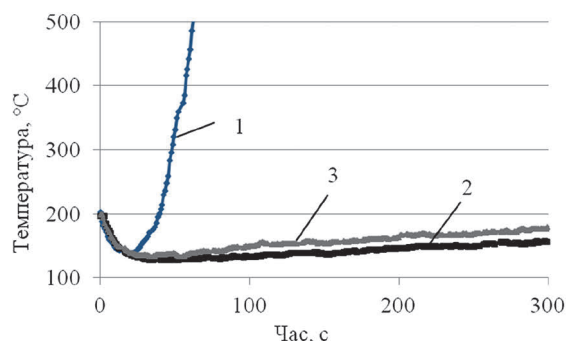


Рис. 6. Динаміка наростання температури димових газів при випробуваннях: зразків необробленої деревини (1), вогнезахисної спучувального лаком (2) та з додаванням загусника (3)

За значенням втрати маси зразків після вогневих випробувань, максимальної температури димових газів встановлено, що оброблення деревини вогнезахисним лаком переводить її до важкогорючих матеріалів.

Висновки і перспективи. Проведено експериментальні дослідження процесу займання зразків деревини та виявлено вплив на цей параметр вогнезахисного покриття. Визначено характеристики параметрів займання та пригнічення горіння, що дають змогу одержувати зміну динаміки горіння при розкладі вогнезахисного покриття. При цьому встановлено зміщення процесу займання зразків деревини у більші часові терміни.

Результати зіставлення експериментальних залежностей швидкості займання деревини з отриманими теоретичними значеннями показали відповідність між ними за допустимого відхилення. Визначено критеріальні характеристики параметрів горіння і припинення та встановлено, що за наявності вогнезахисту за цих часових і температурних впливів займання немає. Це свідчить про утворення теплоізоляційного шару на поверхні деревини, що запобігає вигоранню і проходженню високої температури до матеріалу.

Подальші дослідження будуть спрямовані на вивчення процесів структуроутворення захисного шару, встановлення взаємозв'язку між складовими і властивостями покриттів та оптимізації складу.

Список літератури

- Carosio, F., & Alongi, J. (2016). Ultra-Fast Layer-by-Layer Approach for Depositing Flame Retardant Coatings on Flexible PU Foams within Seconds. *Acs applied materials & Interfaces*, 8:10, 6315–6319. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b00598>
- Churikov, V. A. (2010). *Additional chapters of analysis. Fractional Integration and Fractional Differentiation Based on the d-Operator*. Tomsk [in Russian].
- Ciripi, B. K., Wang, Y. C., & Rogers, B. (2016). Assessment of the thermal conductivity of intumescent coatings in fire. *Fire Safety Journal*, 81, 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.01.011>
- Erdoğan, Y. (2016). Production of an insulation material from carpet and boron wastes. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 152, 197–202.
- Gaff, M., Kačík F., Gašparík M., Makovická Osvaldová, L., & Čekovská, H. (2019). The effect of synthetic and natural fire-retardants on burning and chemical characteristics of thermally modified teak (*Tectona grandis* L. f.) wood. *Construction and Building Materials*, 200, 551–558. <https://doi.org/10.15376/biores.12.4.8451-8467>

- Janna, W. S. (2010). *Engineering Heat Transfer*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Nasir, K. Md., Ramli Sulong, N. H., Johan, M. R., & Afifi, A. M. (2018). An investigation into waterborne intumescent coating with different fillers for steel application. *Pigment & Resin Technology*, 47 (2), 142–153. <https://doi.org/10.1108/PRT-09-2016-0089>
- Rubtsov, N. M., Seplyarskiy, B. S., & Alymov, M. I. (2006). *Critical phenomena and dimensional effects in autowave waves with exothermic*. Saratov [in Russian].
- Tsapko, A. (2017). Installation of fire fighting efficiency of processed processing solution and coverage. *East European Journal Enterprise Technologies*, 4/10 (94), 62–68.
- Tsapko, Yu. V. (2011). Research of kinetic parameters at pyrolysis of wood of fire protection by impregnating means *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*, 19, 163–169 [in Ukrainian].
- Tsapko, Yu., Bondarenko, O., & Tsapko, A. (2019). Effect of a flame-retardant coating on the burning parameters of wood samples. *East European Journal Enterprise Technologies*, 2/10 (98), 49–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.163591>
- Tsapko, Yu. V., Sokolenko, K. I., & Hudovych, O. D. (2005) Modeling of the process of formation of a layer of modified coke on the surface of fire-retardant wood. *Scientific bulletin of NULES of Ukraine*, 2 (12), 5–11 [in Ukrainian].
- Tsapko, Yu. V., & Tsapko, O. Yu. (2019). Influence of high temperature fillers on activation energy of coating for wood protection. *Ukrainian journal of forest and wood science*, 10 (3), 98–105 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31548/forest2019.03.098>
- Zhao, P., Guo, C., & Li, L. (2018). Flame retardancy and thermal degradation properties of polypropylene/wood flour composite modified with aluminum hypophosphite/melamine cyanurate. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 135, 3085–3093. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7544-9>

Lomaha, V. V., Tsapko, Yu. V., Tsapko, O. Yu., Bondarenko, O. P. (2020). Determination of the time of ignition of plant raw under the high temperature of the radiation panel. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 11 (3), 77–84. <https://doi.org/10.31548/forest2020.03.008>

Reducing the fire prevention of timber is not only an economic task, but also has a social and environmental focus. From economic, technological and environmental perspective, an important problem in ensuring the viability and safe operation of construction sites is the development of fire-retardant coatings for wooden structures. The construction is increasingly looking for new highly effective means of fire protection of wood and wood products which should not only ensure the standardized fire resistance of wood, but also to maintain its operational parameters to solve environmental safety and durability. Studies of the effect of the radiation panel on the ignition of the wood sample have set the parameters of the flame ignition, which makes it possible to influence this process. It is proved that they consist in the formation of a layer of organic material on the surface, which provides heating to a critical temperature, when the intensive decomposition of the material begins with the release of the required amount of combustible gases and their ignition. This makes it possible to determine the effect of fire protection and the properties of protective compositions on the process of slowing down the rate of burning of wood. Experimental studies have confirmed that the untreated sample of wood, under the thermal action of the radiation panel has taken up, the flames spread over the entire surface, which led to its combustion. The application of a fire retardant varnish under the influence of temperature leads to a layer of foam coke and inhibition of heat transfer of high-temperature flame to the material and its ignition. Thanks to this, it became possible to determine the conditions for changing the parameters of combustion and braking during fire protection of wood, by forming a barrier for thermal conductivity. Thus, there is reason to argue for the possibility of directional control of the processes of fire protection of wood by the use of fireproof coatings that can form a protective layer on the surface of the material, which slows down the rate of burning of wood.

Key words: protective equipment, ignition, surface treatment, wood burning rate, protection efficiency.

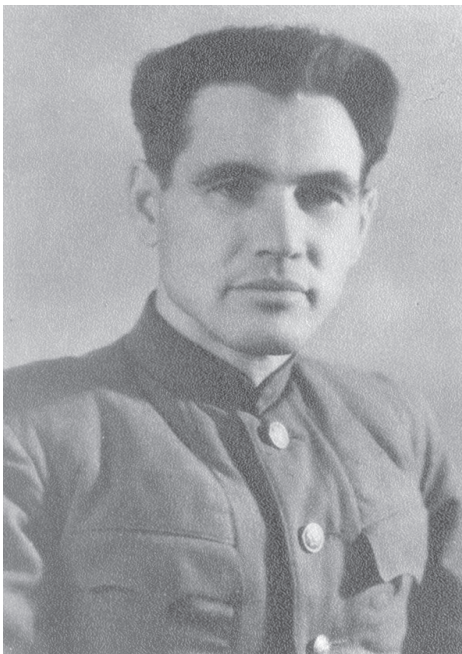
Отримано: 2020-09-18

УДК 929

ІВАН МИКОЛАЙОВИЧ САЗОНОВ – ДОЦЕНТ ЗА АТЕСТАТОМ, ДОКТОР НАУК І ПРОФЕСОР ЗА СУТТЮ (до 110-річчя від дня народження)

В. М. МАУРЕР, кандидат сільськогосподарських наук, професор
<http://orcid.org/0000-0002-1283-7882>, e-mail: forestcrops_chair@ukr.net

С. М. ДУДАРЕЦЬ, кандидат сільськогосподарських наук
<http://orcid.org/0000-0002-9449-3023>, e-mail: dudarec@ukr.net
Національний університет біоресурсів і природокористування України



Народився Іван Миколайович Сазонов 19 липня 1910 р. у станиці Багаєвська Донецької області, в родині селян. Батько, Микола Семенович, з 1929 р. до пенсії пропрацював у колгоспі. Мати, Марія Яківна, померла в 1949 р. У бага-

тодітній родині Сазонових разом з Іваном Миколайовичем зростало дві сестри і п'ятеро братів, четверо з яких загинули в боях Другої світової війни.

Нелегкими були дитячі роки. Упродовж буремних 1917–1924, із перервами, зумовленими революційними змінами і братовбивчою Громадянською війною, І. М. Сазонов закінчив чотири класи початкової школи. Матеріальна скрута змусила його влаштуватися на роботу до кооперативного магазину системи Крайового союзу. Щоденну працю юнак поєднував із навчанням у станичній школі селянської молоді, документ про закінчення восьми класів якої отримав у 1929 р.

Цього ж року Іван Миколайович вступив до Донського інституту сільського господарства і меліорації на лісомеліоративне відділення меліоративного факультету, а у 1933 р. закінчив Новочеркаський інститут інженерів лісомеліорації і отримав диплом інженера-лісомеліоратора.

З квітня 1933 р. до жовтня 1934 р. Іван Миколайович за державним направ-

ленням працював у експедиції Центрального протизсувного комітету Народного комісаріату земельних ресурсів СРСР з обстеження зсувів Веденського району Грозненської області. Одночасно з роботою в експедиції виконував обов'язки завідувача дослідного протизсувного пункту Новочеркаської агролісомеліоративної станції.

З травня до жовтня 1936 р. Іван Миколайович – старший інженер групи озеленення технічного відділу будівництва військового заводу № 182. Роботу у відділі упродовж року поєднував із педагогічною діяльністю у Новочеркаському інженерно-меліоративному інституті, виконуючи обов'язки асистента кафедри лісової меліорації.

З червня 1937 р. до квітня 1938 р. І. М. Сазонов займався проектуванням та обґрунтуванням актуальності створення полезахисних лісових насаджень на сільськогосподарських територіях Кулундинського Степу, Західного Сибіру та Алтайського краю, а з жовтня 1938 р. працював асистентом кафедри лісової меліорації Брянського лісотехнічного інституту.

У січні 1939 р. Івана Миколайовича призвали на дійсну строкову службу до лав Червоної армії. За півтора року військової служби пройшов шлях від курсанта до лейтенанта і в червні 1940 р. був призначений на посаду командира взводу. До початку війни служив у різних частинах Червоної армії південних регіонів країни.

Від першого дня війни Іван Миколайович брав участь у боях із німецько-фашистськими загарбниками на Південному, Воронізькому та 1-му Українському фронтах як начальник хімічної служби 20-го мотострілецького полку 20-ї танкової дивізії та начальник хімслужби 108-го окремого винищувального батальйону, звільняв м. Чернігів. За військові звитяги І. М. Сазонов нагороджений медалями «За бойові заслуги» та

«За перемогу над Німеччиною у Великій Вітчизняній війні 1941–1945 рр.».

З березня 1944 р. займався підготовкою інструкторів із розмінування, а з вересня 1944 р. викладав на військовій кафедрі Київського політехнічного інституту. Після демобілізації, з жовтня 1945 р. капітан І. М. Сазонов працював техніком-нормувальником науково-виробничих майстерень Київського політехнічного інституту, а з липня 1946 р. перейшов на роботу старшим дендрологом Київського зоопарку.



У повоєнні роки Іван Миколайович працював асистентом кафедри лісових культур Київського лісгосподарського інституту (1947–1949 рр.), а пізніше – старшим викладачем і доцентом кафедри лісової меліорації до 1981 р. З 1967 до 1975 рр. доцент І. М. Сазонов завідував кафедрою лісової та гідротехнічної меліорації Української сільськогосподарської академії. Цьому передував успішний захист у Ленінградській лісотехнічній академії ім. С. М. Кірова кандидатської дисертації на тему «Гніздовий посів дуба в зоні бурякосіяння Лісостепу європейської частини СРСР», який відбувся 23 червня 1954 р., та присвоєння Іванові

Миколайовичу 3 квітня 1957 р Вищою атестаційною комісією Міністерства вищої освіти СРСР вченого звання доцента по кафедрі лісової меліорації.

За період роботи на факультеті І. М. Сазонов багато років читав лекції з курсу «Ерозія ґрунтів і боротьба з нею». Наукові інтереси Івана Миколайовича були спрямовані на вивчення росту лісових полезахисних смуг, створених посівом жолудів дуба гніздовим способом. Із цієї тематики доцент І. М. Сазонов підготував докторську дисертацію, яка здобула високу оцінку від колег по кафедрі та членів Ученої ради факультету, попри те, що серед учених колективу тривала гостра наукова дискусія між апологетами і противниками гніздових культур дуба. Перших, разом з Іваном Миколайовичем, очолював професор В. О. Бодров, а других – професор Б. Й. Логгінов. Можливо, ця дискусія і стала причиною того, що автор наукової праці не подав дисертацію до захисту, незважаючи на рекомендацію Вченої ради. Проте це не заважало нам, тодішнім студентам, за науковим рівнем і фаховою компетенцією вважати його, кандидата наук, доцента, завідувача кафедри лісової та гідротехнічної меліорації, справжнім доктором наук і професором.

Колектив кафедри в роки, коли її очолював І. М. Сазонов, продовжував дослідження із пошуків шляхів підвищення захисних властивостей лісомеліоративних насаджень за рахунок удосконалення конструкцій лісосмуг. Розробки кафедри були внесені до «Інструкції з полезахисного лісорозведення на землях сільськогосподарських підприємств України».

За розробку комплексних заходів проти дефляції ґрунтів півдня України І. М. Сазонова разом із доцентом М. О. Штофелем було нагороджено бронзовою медаллю ВДНГ СРСР.

У 1984 р. побачив світ навчальний посібник для студентів ВНЗ «Система заходів проти ерозії ґрунтів», підготовлений І. М. Сазоновим у співавторстві з доцентами М. О. Штофелем та О. І. Пилипенком. Усього Іван Миколайович Сазонов опублікував понад 40 наукових, навчально-методичних і навчальних праць.



Разом із дружиною Клавдією Григорівною виховали доньку Галину та сина Миколу.

Не стало Івана Миколайовича у 1999 р. Ми назавжди збережемо у своїй пам'яті спогади про надзвичайно відкритого, щирого і прямого людину з нелегким життєвим шляхом, який його не зламав, не змінив устої, принципи та цінності світлої і мудрої особистості, яка мала і має, серед тих, хто знав Івана Миколайовича, незаперечний авторитет та щире повагу у колективі інституту та університету.

ДО УВАГИ АВТОРІВ!

До розгляду приймаються наукові статті обсягом **10–20 сторінок тексту** без врахування бібліографічних посилань і анотації англійською або українською мовою (залежно від мови статті). Формат паперу – А4, орієнтація – книжкова, поля з усіх сторін – 20 мм, міжрядковий інтервал – 1,5, кегль шрифту – 14, гарнітура – Times New Roman, абзац – 1 см (лише для основного тексту статті і анотацій).

Структура наукової статті:

- **УДК** (вирівнювання по лівому краю, шрифт – звичайний);
 - **назва статті** (вирівнювання по центру, шрифт – напівжирний, великі літери);
 - **ініціали та прізвище авторів** (вирівнювання по центру, шрифт – напівжирний); **науковий ступінь і вчене звання, ідентифікатор ORCID, електронна адреса авторів, місце їхньої роботи** (вирівнювання по центру, шрифт – курсив), кожен співавтор з нового рядка; студенти і аспіранти додатково вказують наукового керівника в кінці першої сторінки статті у вигляді виноски;
 - **анотація** українською (англійською) мовою (кегль шрифту – 14, курсив, міжрядковий інтервал – 1). Обсяг анотацій українською і англійською мовами повинен бути **не менше 1800 знаків**;
 - **ключові слова** (кегль шрифту – 14, курсив, міжрядковий інтервал – 1) – слово-сполучення (слова), що використовуються для пошуку статті в електронних базах, жодне з них не дублює слова з назви статті;
 - **текст наукової статті** із зазначенням наступних елементів:
 - **Актуальність** – висвітлюється важливість дослідження, існуючі проблеми та напрями їх вирішення в контексті поставлених наукових завдань із зазначенням ще невіршених аспектів питання.
 - **Аналіз останніх досліджень та публікацій**. Подається короткий аналіз результатів досліджень науковців з тематики наукової статті. В кінці цього розділу стисло формулюється основне завдання наукового дослідження у вигляді **Меті** або **гіпотези статті**.
 - **Матеріали і методи дослідження** – детально описується схема дослідження, умови і місце проведення досліду, основні методи і методики дослідження тощо.
 - **Результати дослідження та їх обговорення** – зазначаються отримані результати дослідження та їх аналіз із наведеним порівнянням щодо відомих фактів (бажано за останні 5 років).
 - **Висновки і перспективи** – необхідно представити конкретні результати аналізу та перспективи подальших досліджень.
 - **Подяки** (якщо необхідні!) подаються після висновків перед бібліографічними посиланнями.
 - **список літератури** подається у кінці наукової статті у порядку згадування або у алфавітному порядку, **без нумерації** (кегль шрифту – 14, міжрядковий інтервал – 1). Список літератури повинен містити **не менше 10 літературних джерел** і формується за вимогами **APA 7th Edition**. Посилання у тексті наводяться за зразком (Прізвище, рік), наприклад: один автор – (Vinson, 1997), два автори – (Vargo & Laurel, 1994), ..., шість і більше авторів – (Jones et al., 1978). Детально з правилами можна ознайомитись за посиланням <http://nbuv.gov.ua/node/929> або за прикладами на сайті журналу.
- Всі літературні джерела потрібно наводити **англійською мовою** і не менше трьох із них повинні мати **ідентифікатор DOI**. **Транслітерація** допускається лише прізвищ авторів, видавництва і географічних назв.
- **ініціали і прізвища авторів, тема, анотація та ключові слова**, які надаються **англійською** (українською) **мовою**.