МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет водогосподарської інженерії та екології
Кафедра екології

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
зав. кафедри екології, доц.
_____Вікторія КАЦЕВИЧ
«____» _____2026 р.

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи

освітнього ступеня «Бакалавр»

на тему: «Ефективність внесення осаду стічних вод при вирощуванні павловнії (Paulownia) на техноземах»

Виконала: здобувачка вищої освіти 4 курсу,
групи Ез-1-21 спеціальності 101 Екологія
_____Тетяна КОВАЛЬ

Керівник: д.с.-г.н., проф.

_____Микола ХАРИТОНОВ

Дніпро-2026

Дніпровський державний аграрно-економічний університет
Факультет водогосподарської інженерії та екології

Кафедра екології

Спеціальність 101 Екологія

ЗАТВЕРДЖУЮ:
зав. кафедри екології, доц.
_____Вікторія КАЦЕВИЧ
«____» _____2026 р.

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу для здобуття освітнього ступеня «Бакалавр»
здобувача вищої освіти
Коваль Тетяни Олександрівни

1. Тема проекту (роботи) «Оцінка ефективності внесення осаду стічних вод при вирощуванні павловнії на техноземі»
керівник роботи: Харитонов М.М., д.с.- г.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджена наказом по університету від «24» квітня 2026 р. № 821

2. Термін здачі здобувачем вищої освіти закінченого проекту (роботи): «15» червня 2026 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) дані дрібноділянкого досліду з вивчення впливу від внесення осаду стічних вод на показники росту павловніх на техноземі

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити):
Вступ. 1 Огляд літератури; 2 Фізико географічне положення району досліджень; 3 Матеріали і методи; 4 Результати досліджень; 5 Економічна частина; 6 Охорона праці; Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
Рисунків – 14
Таблиць – 2
Використаної літератури – 31
Розділів – 5
Сторінок – 62

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН РОБОТИ

№ п/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
№ п/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вступ	20.04.26 – 21.04.26	виконано
2.	Огляд літератури	26.05.26 – 04.05.26	виконано
3.	Фізико-географічне положення району досліджень	06.05.26 – 13.05.26	виконано
4.	Матеріали і методи	19.05.26 – 22.05.26	виконано
5.	Результати досліджень	27.05.26 – 31.05.26	виконано
6.	Економічна частина	01.06.26 – 03.06.26	виконано
7.	Охорона праці	04.06.26– 05.06.24	виконано
8.	Висновки	05.06.26 – 09.06.26	виконано
9.	Оформлення роботи	10.06.26– 15.06.26	виконано

Здобувач вищої освіти _____ /Коваль Т.О./
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____ /Харитонов М.М./
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Зміст розрахунково-пояснювальної записки: Вступ; 1 Огляд літератури; 2 Грунтово-кліматична оцінка району досліджень; 3 Матеріали і методи; 4 Результати досліджень; Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях; Висновки. Повний обсяг роботи – 62 сторінки друкованого тексту, 10 рисунків, 2 таблиці. Перелік посилань містить 31 найменування.

Мета роботи – на підставі дрібно ділянкового досліду з вирощування паволовнії за різних доз внесення осаду стічних вод на техноземі, надати рекомендації щодо перспектив створення плантацій павловнії на рекультивованих землях.

Об’єкт дослідження – процеси росту, фізіології та біохімії рослин павловнії у польовому досліді .

Предмет дослідження – показники росту, фізіології та хімічного складу листя павловнії, яка вирощується на техноземі.

Завдання:

1. Проаналізувати існуючі результати досліджень та наукові праці щодо особливостей вирощування павловнії в різних грунтово-кліматичних умовах

2. Оцінити перспективи вирощування павловнії для народного господарства України.

3. Визначити особливості росту павловнії на техноземі залежно від доз внесення осаду стічних вод.

4. Оцінити фізіологічний стан рослин павловнії залежно від доз внесення осаду стічних вод.

5. Провести оцінку накопичення важких металів в листі павловнії залежно від внесення доз осаду стічних вод.

6. Надати термогравіметричну оцінку листя павловнії залежно від від внесення доз осаду стічних вод.

Методи, які застосовувались: біометричний, атомно-абсорбційний, спектрорадіометричний, термогравіметричний, порівняльний аналіз, графічні методи.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	10
1.1. Вирощування павловнії в різних природно-кліматичних умовах	10
1.2. Умови зростання та технології вирощування павловнії	15
1.3. Властивості та використання деревини павловнії	24
1.4. Ризики та перспективи вирощування павловнії в Україні	31
2.ГРУНТОВО-КЛІМАТИЧНА ОЦІНКА РАЙОНУ ДОСЛІДЖЕНЬ	36
3.МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ	38
3.1.Оцінка стану природного середовища в районі видобутку марганцевої руди.	38
3.2.Польові експерименти на території навчально дослідної станції рекультивації порушених земель	39
4.РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.	45
4.1.Вивчення впливу осаду стічних вод за вирощування павловнії на техноземі	45
4.2. Оцінка вмісту важких металів у листі павловнії	46
4.3.Оцінка фізіологічного стану рослин павловнії	47
4.4. Термогравіметрична оцінка листя павловнії	47
5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	49
5.1. Аналіз умов праці під час вирощування павловнії на техноземах	49
5.2 Потенційно небезпечні та шкідливі фактори під час вирощування павловнії на техноземах із застосуванням осаду стічних вод	50
5.3 Вимоги безпеки під час проведення польових робіт та внесення осаду стічних вод	52
5.4 Безпека в надзвичайних ситуаціях	54
5.5. Заходи щодо покращення умов праці та підвищення рівня безпеки	56
ВИСНОВКИ	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	60

ВСТУП

Зміна клімату призвела до швидкого зростання досліджень щодо скорочення викидів вуглекислого газу (CO_2). Однією з форм скорочення викидів CO_2 є використання альтернативних джерел енергії, включаючи біомасу. Різні прогнози передбачають стабільне зростання попиту на використання деревини та деревних матеріалів щонайменше до 2050 року. У всьому світі спостерігається стрімкий зростаючий інтерес до швидкозростаючих видів деревини, які можна використовувати для отримання біомаси, як один з найшвидше зростаючих видів дерев у світі. Рід *Paulownia* останніми роками викликав величезний інтерес з боку наукових кіл та промисловості. Кількість дослідницьких програм з перевірки можливості вирощування та використання деревини павловнії як сировини значно поширилася за останні роки. Ці дослідницькі програми проводяться одночасно в різних галузях, і їх кількість тільки зростає. З одного боку, це позитивний розвиток, що призводить до широкого вивчення можливостей використання павловнії, але з іншого боку, виявляються численні обмеження. Також висловлювалися сумніви щодо попереднього оптимізму щодо універсальних швидкозростаючих видів.

Дерево павловнія (*Paulownia spp*.) культивується та використовується в Китаї вже тисячі років. Серед іншого, його деревина використовувалася у виробництві меблів, традиційних музичних інструментів та в агролісових системах для підвищення врожайності сільськогосподарських культур. Перші дерева павловнії були завезені до Європи в середині дев'ятнадцятого століття. Завдяки своєму декоративному вигляду, великому листю та швидкому зростанню, павловнія швидко стала популярною в Європі та була висаджена в садах і парках. Сьогодні цей вид поширився по всьому світу. Наразі офіційно визнано сім видів та два види гібридів павловнії.Вони відрізняються за способом росту, екологічною амплітудою (тобто вимогами до температури та води) та зовнішнім виглядом. Рід Paulownia походить з Китаю, але швидко здобув популярність в Азії, Африці, Австралії США, Японії та в Європі. Ще в січні 2020 року Міністерство енергетики та захисту довкілля України представило Концепцію «Зеленого енергетичного переходу України до 2050 року». Концепція спрямована на досягнення кліматично

нейтральної економіки до 2070 року. Серед основних напрямків декарбонізації економіки, включаючи енергетику як її важливу складову, визначено наступні: розвиток відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у поєднанні з підвищенням енергоефективності; скорочення споживання вуглецемістких енергоресурсів до нуля та максимізація використання ВДЕ, щоб сільськогосподарський та лісовий сектор могли перейти на повну самозабезпеченість енергетичними ресурсами; збільшення сталого виробництва біомаси, біопалива та інших ВДЕ для підтримки реалізації «зеленого» переходу в інших секторах економіки. Біомаса наразі розглядається як перспективне відновлюване джерело енергії, яке може бути стало використане у виробництві палива та електроенергії, не додаючи вуглекислого газу до навколишнього середовища. Серед відновлюваних джерел енергії біомаса може бути використана для задоволення різноманітних енергетичних потреб, включаючи виробництво електроенергії, опалення будинків, заправку транспортних засобів та забезпечення технологічним теплом промислових об'єктів (Гументик, 2021). Енергія біомаси також генерує менше викидів в атмосферу, зменшує кількість відходів, що потрапляють на звалища, та зменшує нашу залежність від іноземної нафти. Паливо, отримане з енергетичних культур, є не тільки потенційно відновлюваним, але й досить схоже за походженням на викопне паливо (яке також походить з біомаси), що забезпечує пряму заміну (Бондар та Фурса, 2015). Біоенергетичні культури легко зберігати, транспортувати, вони доступні за ціною та можуть бути перетворені на широкий спектр джерел енергії за допомогою існуючих та нових технологій перетворення, і таким чином можуть бути потужною альтернативою традиційним видам палива у XXI столітті. Все більше країн світу починають віддавати перевагу високопродуктивним енергетичним культурам з високою врожайністю біомаси та високим вмістом целюлози як сировині для виробництва біопалива. До таких культур належать верба (*Salix*), тополя (*Populus L.*) та павловнія (*Paulownia tomentosa*). Невибагливість до ґрунтово-кліматичних умов вирощування дозволяє вирощувати ці багаторічні фітоенергетичні рослини на малопродуктивних ґрунтах з пересіченим рельєфом. Окрім власне енергетичної вигоди, це допоможе зберегти ґрунт від водної ерозії, зменшити втрати поживних речовин при поверхневому змиві та деградації ґрунту. Крім того, ці рослини характеризуються низькими виробничими витратами та не потребують значного

використання добрив та пестицидів. Це дозволить вирощувати енергетичні рослини на землях, виведених із сівозміни. Якщо оцінити повний потенціал використання неосвоєних земель України, то у 2018 році він становив 4 млн га, що можна визначити як теоретичний потенціал вирощування енергетичних культур(Соломаха та ін, 2022). При його повному використанні можна замінити близько 20 млрд $м^3$ природного газу. Технічно досяжний потенціал становить 2 мільйони гектарів землі, що еквівалентно заміщенню 10 мільярдів $м^3$ газу або 34% споживання (за даними ВАТ «Нафтогаз України», у 2019 році Україна спожила 29,8 мільярда $м^3$ природного газу. У грошовому еквіваленті використання цих земель для вирощування енергетичних культур дозволить здійснити імпортозаміщення на суму близько 1,8 мільярда доларів. Використання дров як основного джерела теплової енергії в зимовий час у холодних регіонах України та нестійке використання лісів посилили інтерес до дослідження альтернативних стійких джерел енергії. Використання біомаси швидкозростаючих культур є відомою практикою у всьому світі, але менш відомою та використовуваною в Україні. Серед багатьох деревних і трав'янистих швидкозростаючих культур павловнія вважається «чарівною» завдяки своїм швидким темпам зростання та великій кількості деревини, що утворюється за короткий період часу (Гументик, 2021). Наразі визнано щонайменше шість видів павловнії: P. *elongata, P. fargesii,P. fortunei, P. glabrata, P. taiwaniana* та *P. Tomentosa*. Вона також широко відома як Кірі. Павловнію культивують у Китаї щонайменше 3000 років; «Монографія про павловнію» Чень Чу була опублікована за часів династії Сун у 1049 році до нашої ери. Є свідчення того, що її використовували для виготовлення трун близько 600 року до нашої ери, а у великих масштабах вона культивувалася не пізніше 200 року до нашої ери. Протягом багатьох століть китайці садили павловнію навколо своїх будинків, щоб привабити фенікса та принести удачу. Його також називають деревом китайської імператриці, деревом принцеси або деревом Кірі. Деревина павловнії експортувалася з Китаю до Японії, де її використовували для виготовлення виробів ручної роботи, таких як арфи та весільні скрині. У деяких частинах Японії існує звичай садити дерево павловнії, коли народжується дівчинка, щоб деревину можна було використовувати для виготовлення її весільної скрині.

Мета роботи – на підставі дрібно ділянкового досліду з вирощування

паволовнії за різних доз внесення осаду стічних вод на техноземі, надати рекомендації щодо перспектив створення плантацій павловнії на рекультивованих землях.

Об’єкт дослідження – процеси росту, фізіології та біохімії рослин павловнії у польовому досліді .

Предмет дослідження – показники росту, фізіології та хімічного складу листя павловнії, яка вирощується на техноземі.

Завдання:

7. Проаналізувати існуючі результати досліджень та наукові праці щодо особливостей вирощування павловнії в різних грунтово-кліматичних умовах

8. Оцінити перспективи вирощування павловнії для народного господарства України.

9. Визначити особливості росту павловнії на техноземі залежно від доз внесення осаду стічних вод.

10. Оцінити фізіологічний стан рослин павловнії залежно від доз внесення осаду стічних вод.

11. Провести оцінку накопичення важких металів в листі павловнії залежно від внесення доз осаду стічних вод.

12. Надати термогравіметричну оцінку листя павловнії залежно від від внесення доз осаду стічних вод.

Методи, які застосовувались: біометричний, атомно-абсорбційний, спектрорадіометричний, термогравіметричний, порівняльний аналіз, графічні методи.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Вирощування павловнії в різних природно-кліматичних умовах

Paulownia tomentosa (Thunb.) Steud та P. fortunei (Seem.) Hemsl. – це роди/види рослин, що належать до родини Paulowniaceae, але історично були включені до роду Catalpa Scop. та родини Scrophulariaceae. Сучасні генетичні дослідження оновили систематичну приналежність Paulownia. Подальші розмежування були проведені в родинах Scrophulariaceae та Bignoniaceae, що призвело до виділення нової родини Paulowniaceae, причому Paulowniaceae генетично ближча до Lamiaceae, ніж Scrophulariaceae. Наразі немає єдиної думки щодо кількості видів Paulownia, перелічено від шести до дванадцяти видів. Дерево павловнія надзвичайно морозостійке; воно має широкий діапазон переносимості температур і, як відомо, росте на висоті до 2000 м. Павловнія може виживати між широтами 40° пн. ш. та 40° пд. ш. та на висотах до 2000 м. Хоча дерево може витримувати температури від -20°C до +40°C, оптимальні умови для росту - від 24°C до 29°C. У регіонах зі значними сезонними коливаннями температури рекомендується вкутувати молоді дерева травою на зиму (щоб захистити кору від пошкодження внаслідок замерзання) та фарбувати їх на літо (щоб захистити кору від сонячних опіків). Молоді дерева павловнії дуже високі, але можуть ще не розвинути розгалужену кореневу систему для забезпечення кріплення; сильні вітри можуть призвести до поломки або нахилу стебел, які слід випрямити, підперти та підгорнути.За оптимальних умов можна очікувати збільшення висоти на 5-6 м протягом першого вегетаційного періоду та щорічного приросту діаметра на висоті грудей на 3-4 см. Розширення стовбура павловнії є симподиальним; однак швидкий ріст бічних гілок надає їй вигляду моноподіальної моделі росту. Павловнія – листопадне дерево, яке в природних умовах може досягати висоти 20–30 м, а в Китаї, країні її походження, – до 50 м. Її діаметр може досягати 2 м. Дерево має парасолькоподібну, низько посаджену крону, а зелені частини рослини вкриті тонкими волосками. Рідкісне листя утворює циліндричну крону. Листя на дорослому дереві досягає довжини 15–30 см та ширини 10–12 см, з гладкими та плетеними боками); у старіших рослин воно менше (рис.1.1).



Рис. 1. 1. Павловнія клон 112.Стаціонар ДДАЕУ

Нові рослини мають велике листя та довге стебло з лопатевими боками, розміщене спереду,одна з одною або у формі спіралі. Павловнія працює за схемою фотосинтезу типу С4 з високим рівнем органічної речовини в листках. Кора павловнії коричнева або чорна, гладка, але з видимими чечевицями у молодого дерева, з віком з'являються вертикальні тріщини. Часто всі частини, крім старих гілок, покриті залозистим слизовим волоссям, густим волоссям та розгалуженими волосками або стерлуватими (зіркоподібними). Більшість видів павловнії мають псевдодикомоту, яка висихає після періоду в'янення. Рослина павловнія має тенденцію утворювати багато гілок, якщо її вирощувати на відкритому просторі, тоді як у лісі вона, як правило, утворює прямий стовбур. Вісім років досліджень різних методів, включаючи брунькування гілок та розвиток обрізки, дали різні результати. Оптимальні результати були отримані для обрізки помірної інтенсивності як найкращого рішення для швидкого росту брунькуючих гілок та розвитку видовженого стовбура. Павловнії мають глибоку та добре розвинену кореневу систему, яка утворює кілька гілок і зазвичай досягає глибини 2 м. Повідомлялося про зареєстровані приклади кореневих систем, які майже втричі ширші за крону. Їхні потужні та швидкозростаючі кореневі системи також можуть проникати на більшу глибину за сприятливих умов і можуть бути використані, наприклад, для стабілізації зсувів (*Huseinovic et al., 2017*). Квіти пендицелярні з

двома або п'ятьма квітками зі стеблами або сидячими суцвіттями (майже зчленованими біля основи). Вони утворюються в осях зменшуваного або дрібного листя влітку або восени(рис.1.2).



Рис. 1.2. Бутони та квіти павловнії

Квіти розміщені біля верхівкової основи. Чашечка яскрава, дзвоноподібної форми з п'ятьма нерівномірно трикутними лопатями. Ці трикутні лопаті мають верхню головну лопатку більшу та переважно волосисту. У кількох видів павловнії волоски опадають під час цвітіння. Велика, пряма квітка до 15-30 см складається з трубчастих квіток висотою 5-6 см.

Павловнія рано вступає у фазу розмноження, зазвичай через 4-5 років, але за нормальних умов може досягати і 8-10 років. Віночок великий, фіолетового до білого кольору, з двома губами та двома лопатями на верхній губі та трьома видовженими лопатями на нижніх. Дзвоник зазвичай знаходиться на відстані 5 мм від основи та пізніше поступово або одразу подовжується. Плоди мають коробочки висотою 2,5-4 см та діаметром 2,5 см. Кожна частина коробочки має дві частини, що містять багато дрібного насіння з крильцями. Кількість насінин у плоді може сягати 2000 при довжині 1,5-3 мм, грам насіння містить 5000 дрібних насінин. Коренева система павловнії відносно поверхнева або глибока, добре розвинена, залежно від кліматично-ґрунтових умов. Верхнє коріння тонке, дихотомічно розгалужене та росте з високою щільністю. Всмоктувальне коріння довге, зазвичай 1-5 мм у діаметрі та розширене до 60 см. Розвиток та розширення кореневої системи, очевидно, залежить від рівня підземних вод, фізичних характеристик ґрунту та доступних поживних елементів. Хоча вони й розширені, вони не створюють сильного головного кореня. Характеристики стійкості коренів, стабільності розмірів та високої температури горіння зробили деревину павловнії

добре відомою на світовому ринку (Ates et al., 2008). Наявність глибокої кореневої системи, пов'язаної з високим вегетативним ростом, що сприяє швидшому поглинанню поживних речовин, ніж у інших видів, збільшує використання цього виду для фіторемедіації землі від важких металів. Павловнії розмножуються генеративно та вегетативно; однак у промислових умовах розмноження майже повністю вегетативне. Історично найдавнішим методом розмноження було розщеплення коренів, яке також використовується для природних видів. Також використовувалося розщеплення коренів на ранній стадії розвитку, відоме як техніка міні-живців, або активація процесу вкорінення для зелених живців. Однак основним способом розмноження багатьох клонів є розмноження in vitro. Одним з найважливіших кроків у фазі розмноження є формування здорової, добре розвиненої кореневої системи. Дерева слід садити на початку весни. Посадка повинна бути достатньо глибокою, щоб забезпечити хороше закріплення молодих дерев. Після посадки навколо саджанця слід насипати 15-20 см ґрунту. Саджанець повинен бути віком щонайменше один рік і мати розвинену кореневу систему, щоб мінімізувати втрати.

Найпоширенішими культивованими видами є P. tomentosa, P. elongata, P. fortunei, P. taiwaniana, P. fargesii, P. galbrata та P. catalpifolia. На ранніх етапах інтродукції павловній у всьому світі використовувалися чисті ботанічні види. Однією з перших країн, яка впровадила її у великих масштабах, були США, а павловнії (P. tomentosa) були імпортовані приблизно у 1840 році. Через швидке зростання її назвали «деревом майбутнього». За останні 150 років вона поширилася по різних штатах, спричинивши багато проблем, що призвело до гарячих дебатів щодо всіх видів павловнії. Paulownia tomentosa офіційно була оголошена інвазивним видом, настільки, що її було викорінено в багатьох штатах. Більш поблажливе ставлення було надано P. elongata, яка не є настільки інвазивною, але також неохоче приймається. У США павловнія має стільки ж противників, скільки й прихильників, і дискусії щодо роду точаться палкими, оскільки існуючі культури приносять їхнім власникам значний прибуток (Snow, 2015). Недавні дослідження показали, що P. tomentosa може поширюватися в районах, де насадження були пошкоджені різними лихами та порушеннями, особливо в кроні дерев (Chongpinitchai & Williams, 2021). У деяких країнах деякі види павловнії були

оголошені небезпечними, такі як P. tomentosa, яку було визнано інвазивним видом в Австрії та Чехії. Державні органи Польщі також обережно ставляться до масового впровадження павловній. Природні види павловнії досі вирощуються по всій Азії, аж до Туреччини, але все частіше замінюються гібридами. У деяких країнах, таких як Болгарія, гібриди набули значення як потенційний продукт лише після того, як попередні спроби культивувати чисті види зазнали невдачі. Для виробництва гібридів особини відбираються з кількох популярних видів, які демонструють високу продуктивність та високу адаптивність до навколишнього середовища, включаючи P. elongata × P. fortunei та P. fortunei × P. tomentosa. Наразі дослідники працюють над створенням нових сортів з високою продуктивністю. Іспанські дослідники створили клони павловнії in Vitro 112® (з 2003 року з Paulownia elongata x fortunei) та Paulownia cotevisa 2, гібридні клони, які мають високу стійкість до екстремальних температур від -25 до 45°C та високоякісну деревину . Ці гібриди відіграють важливу роль у виробництві деревини для промисловості та для спалювання (Bikfalvi, 2013). Клон павловнії in Vitro 112® та павловнії Cotevisa 2 мають швидший ріст порівняно з іншими сортами павловнії, досягаючи діаметра 25 – 30 см та висоти 15 – 20 м (~ 0,3 м3/дерево) з третього року. Це скорочує час збору врожаю кожні 3 роки та підвищує продуктивність. Інші з найвідоміших гібридів - це клони Sundsu 11 та Shan Tong. Існують також і природні гібриди, такі як P. taiwaniana, отримані в результаті схрещування P. kawakamii та P. fortunei. Плантації павловнії створюються з певною щільністю залежно від кінцевого використання. Зазвичай їх висаджують з інтервалом від 2 × 1,5 м² до 4 × 4 м². Для виробництва біомаси висаджують близько 2000–3300 рослин/га, тоді як для виробництва деревини висаджують значно менше, близько 550–750 дерев/га (Dubova et al., 2019). Павловнія повстяна – це велике деревоподібне дерево, яке вирощують переважно заради його швидкозростаючої деревини та зовнішнього вигляду. Країною походження цієї рослини є Китай. Незвичайного екзотичного вигляду дереву надають великі бузково-фіолетові квіти. Paulownia tomentosa Steud. – це новий, перспективний вид для використання в ландшафтному дизайні українських міст. Дерево адаптується до міських районів. Широкі крони дерев забезпечують густу тінь у парках і скверах, зонах відпочинку, збагачують їх свіжим повітрям, особливо в промислових містах, де воно каламутне переважно через

вихлопні гази. Завдяки розміру листя одне дерево павловнії може поглинати до 22 кг CO_2 щодня та виділяти 6 кг кисню. Залежно від стану навколишнього середовища павловнія може досягати висоти до 30 м. Вона може розвиватися як великий кущ. Павловнія – це не просто екзотичне дерево. Важко перерахувати всі сфери використання цієї рослини. Деревина, листя, квіти – усі вони мають властивості, які може використовувати людство. Швидке зростання дерев надзвичайно придатне для отримання біомаси за короткий час. Гібриди павловнії вирощуються з короткими, 6–10-річними циклами для їх круглої деревини, але ці цикли можуть бути ще коротшими для біомаси. Вирощування павловнії повстяної в Запоріжжі розпочалося з одного екземпляра в міських ботанічних садах. Студенти Запорізького національного університету вирощують павловнію повстяну з насіння.

Павловнія споживає близько 2000 літрів води на одне дерево, щоб досягти врожайності 4,3 т/га під час першого зрізання. Павловнія має високу адаптивність до кліматичних умов ґрунту. Цей вид дуже адаптивний та широко поширений. Він має природне поширення від тропічних зон до зон з помірним кліматом. А також до зон, де річна кількість опадів становить від 500 до 2000 мм, а найвища висота від рівня моря сягає 2400 м. Відповідні умови для вирощування павловнії досягаються на висоті 200–1300 м над рівнем моря із середньорічною температурою 15–23°C та річною кількістю опадів 1400–2800 мм.

1.2. Умови зростання та технології вирощування павловнії

Найвідомішою особливістю павловнії є її здатність досягати гігантських розмірів за дуже короткий час. У Китаї про павловнію кажуть, що вона «за один рік схожа на жердинку, за три роки — на парасольку, а за п'ять років її можна розрізати на дошки». У Китаї описані рекордні екземпляри, такі як 80-річна P. fortunei, що росте в провінції Квейчжоу, яка досягла висоти 49,5 м, діаметра на висоті грудей (ДВГ)202 см та об'єму деревини 34 м^3. інша, у віці 90 років, мала ДВГ 224 см та об'єм деревини 44 м^3. Серед молодших дерев 11-річна *P. fortunei*, вирощена в автономному районі Гуансі-Чжуан на півдні Китаю, мала висоту 22 м та ДВГ 75,1 см з об'ємом деревини 3,69 м^3. Подібних розмірів досягла також *P. elongata*(Zhu et

al, 1986). У природних умовах Китаю павловнії зазвичай досягають 30–40 см об'єму деревини за 10 років і виробляють близько 0,3–0,5 м^3 деревини, хоча в оптимальних умовах корисну деревину можна отримати за 5–6 років (Zhu et al, 1986). Використання природних видів як культур було популярним заходом у Китаї та Південно-Східній Азії протягом століть. Порівняно з іншими видами, павловнії дуже добре демонструють динаміку росту, навіть порівняно з найшвидше зростаючими тополями (Navroodi, 2013). Підтверджено, що порівняно з іншими швидкозростаючими деревами, такими як верба, тополя, евкаліпт і червоний дуб, павловнії досягають найбільшого зростання в оптимальних умовах (Navroodi, 2013). Ці умови, особливо рівень освітлення, впливають на фотосинтез, від якого ріст павловнії виграє в оптимальних умовах і обмежується несприятливими умовами. Для оптимального росту цьому дереву потрібна інтенсивність світла від 20 000 до 30 000 люкс (Zhu et al, 1986). Павловнії здійснюють фотосинтез на основі ферментів C4-циклу, на відміну від класичного C3-циклу, характерного для більшості рослин. Їхня більша фотосинтетична ефективність у правильних умовах дозволяє павловніям швидко набирати вагу за короткий період. Хоча механізми C4 присутні у павловній, гібридні лінії, як правило, проявляють активність C3. Активність ферментів, що беруть участь у циклі C4, дуже мінлива і часто обмежена. На павловнії значно впливають умови їхнього росту та розвитку, особливо стрес, спричинений, наприклад, посухою або засоленням. Завдяки цим механізмам павловнії можуть демонструвати високу адаптацію до стресових умов навколишнього середовища. Однак їх інтенсивний ріст вимагає великої кількості води — від 1000 до 2000 л на саджанець у перший вегетаційний період. Особливо важливо поливати в перші місяці росту. Водопостачання також може сприяти утворенню більшої кількості листя та, як наслідок, збільшенню росту пагонів. Павловнії потребують проникного ґрунту зі значенням pH вище 5 (5–8,9) та оптимальна температура 15–16 ◦C. Однак дослідники зазначають, що масове виробництво значною мірою залежить від якості ґрунту, що виражається індексом якості ґрунту. Через швидкість виробництва біомаси павловнії, у ґрунті можуть спостерігатися помітні зміни. Після року моніторингу ґрунту було виявлено, що деякі мікробіологічні параметри знизилися навколо дерев, що пов'язано зі зниженням вмісту поживних речовин. Інші дослідники повідомляли про подібні

зміни, пов'язані з мікробною активністю ґрунту та мікробним співтовариством ґрунту. Одним із запропонованих рішень було використання залишків, що виробляються лісовою біомасою. Це головним чином передбачає використання біомаси соснової кори та ясена. Ґрунт, збагачений цими компонентами, може підтримувати баланс між мікробною активністю та співтовариством. Павловнії виявили чутливість до засоленості ґрунту, що часто є характерною рисою напівпосушливих регіонів. Іноді цей стан може посилюватися евапотранспірацією павловнії. Ця чутливість не однакова для всіх видів павловнії; Було рекомендовано створювати лінії стійких гібридів. Стрес, спричинений засоленістю ґрунту, може посилити вплив високого світлового стресу, що, в свою чергу, знижує ефективність фотосинтезу. Оптимальна температура повітря для швидкого росту павловнії становить 27 ◦C, але спектр екстремальних температур, які вона може переносити, широкий і коливається від -25 до 47 ◦C (Zhu et al, 1986). Однак ці значення варіюються залежно від виду, природна толерантність до мінімальних температур становить -20 ◦C для P. tomentosa, від -15 ◦C до -18 ◦C для *P. elongata* та *P. catalpifolia*, та від -5 ◦C до -10 ◦C для *P. fortunei, P. kawakamii* та *P. fargesii*. Інтродукційні експерименти, проведені в Китаї, призвели лише до часткового виживання за нижчих температур. Оскільки гібриди зараз вирощуються переважно в південній Європі, де не бувають сильні морози, підтверджених даних щодо морозостійкості інтродукованих гібридів немає. Однак, деякі спостереження були зроблені щодо виживання молодих саджанців у регіонах, де трапляються заморозки та замерзання. Виживання саджанців у турецьких експериментах на саджанцях, що походять з Китаю, становило 60–90%, причому один експеримент призвів до виживання лише 50%. У Північній Ірландії, де умови зовсім інші, виживання коливалося від 70% до 95% для гібридів іспанського походження, за винятком одного дослідження, де виживання становило лише 20%, тоді як виживання гібридів марокканського походження коливалося від 30% до 33,3%. Деякі автори також повідомляли, що всі їхні саджанці загинули взимку. Деякі дослідження вказували на те, що заморозки особливо шкідливі для росту молодих саджанців павловнії, коли пагони зелені, тобто на початку зими або під час весняних заморозків. Дослідження, проведені в Чеській Республіці, показали незадовільний ріст через заморозки в клоні in vitro 112 протягом перших двох років

вирощування. Порівнюючи тривалість вегетаційного періоду павловнії *Oxytree* (клон *in vitro 112*) на північному сході Польщі, у 2019 році було зафіксовано коротший вегетаційний період на 28 днів порівняно з 2018 роком (Lisowski & Porwisiak, 2020). Ще одним фактором, що обмежує ріст павловнії, є тривалість вегетаційного періоду, яка є змінною в кліматичних умовах Центральної Європи. Павловнії мають дуже велике листя в ювенільному стані, а стебло на цій стадії недостатньо дерев'яніє, що робить його схильним до механічних пошкоджень. Тому ще одним шкідливим фактором можуть бути сильні вітри, які у відкритих умовах можуть знищити цілу плантацію. Експерименти в Новій Зеландії показали, що молоді дерева та гілки схильні до пошкоджень від швидкості вітру до 40 км/год, і що вітер може обмежувати ріст дерев навіть після 3–4 років. У природних умовах за 10 років павловнія розвиває стовбур діаметром 30-40 см, виміряний на висоті 1,2 м від землі, утворюючи об'єм 0,3-0,5 $м^3$ (Ates et al., 2008). Кожне дерево павловнії віком 5-7 років може дати 1 $м^3$ деревини на поверхні з густотою 2000 рослин/га, забезпечуючи загальний урожай 330 т/га. На ділянках, засаджених меншою кількістю рослин на одиницю поверхні, можна досягти врожаю 150 т/га. Стовбур павловнії легкий, міцний, швидко сохне, естетично приємний, зі світлим кольором, який не змінюється, легко обробляється та підходить для різьблення та ізоляції без стиків та з м'якою поверхнею, з питомою масою 0,35 г/$см^3$. Деревина павловнії має низьку теплопровідність (0,063 – 0,086 ккал/м год вуглецю) та природну стійкість до вогню та пошкоджень, вона стійка до деревних черв'яків та термітів завдяки високому вмісту танінів. Завдяки швидкому зростанню та високій концентрації целюлози до 440 г целюлози/кг деревина павловнії вважається достатньою для використання в целюлозно-паливній промисловості, а також як тверде біопаливо (Ates et al., 2008). Квіти та листя павловнії є добрим джерелом жирів, цукрів та білків для годівлі великої рогатої худоби. Азотні сполуки в листі павловнії можна порівняти з кількома рослинами родини бобових. Вони мають таку ж поживну цінність, як і люцерна, і підходять для годівлі великої рогатої худоби, особливо овець та кіз, особливо в поєднанні з пшеничною соломою або силосом. Листя павловнії використовується як зелене добриво у вигляді компоту. Дерево віком 8–10 років виробляє близько 100 кг зеленої речовини (листя), приблизно 2,8–3% N та 0,4 K. Павловнія має високий коефіцієнт фіксації вуглецю, швидке зростання

біомаси вимагає великої кількості CO2, поглинаючи близько 1250 т/га/рік. Дерево поглинає близько 22 кг CO_2 та видихає 6 кг O_2 на рік, отримуючи таким чином очищення тисяч кубічних метрів повітря. У плантаціях павловнії вміст вуглецю в землі збільшується в результаті накопичення органічної речовини з опалого листя, тоді як широка коренева система відіграє важливу роль у безперервному розподілі вуглецю в землі та утриманні підземних вод. Павловнію можна обрізати 4-5 разів, а її ріст покращує стан землі, що відрізняє її як стійку порівняно з іншими біомасовими системами. Високий рівень цвітіння павловнії є гарним джерелом для виробництва меду, що дозволяє отримувати до 700 кг меду/га/рік. Мед має світлий колір і високу якість, навіть вищу, ніж акацієвий. Він спеціально використовується для лікування респіраторних захворювань, проблем з легенями та травною системою. Чай та сироп, отримані з квітів павловнії, позитивно впливають на проблеми з печінкою та селезінкою, а також на бронхіт. Останнім часом квіти використовуються в косметичній промисловості для виробництва парфумів, кремів тощо.

Павловнія — це дерево з глибоким корінням та добре розвиненою кореневою системою. Зазвичай є кілька великих, дихотомічно розгалужених коренів, що ростуть вниз (довжиною до 8 метрів). Поглинальне коріння має товщину 1-5 мм та довжину до 60 см. У піщаних ґрунтах 76% поглинаючої кореневої системи знаходиться на глибині 40-100 см; лише 12% кореня знаходиться в перших 40 см ґрунту. Павловнія дуже стійка до несприятливих ґрунтових умов, але чутлива до перезволоження. Розвиток кореневої системи значно залежить від структури ґрунту; пухкий, добре дренований піщаний ґрунт ідеально підходить для павловнії. Отже пухкі, добре дреновані ґрунти з pH від 5 до 8 ідеально підходять. Важкі торф'яні ґрунти теж підходять; Глинисті та кам'янисті ґрунти – ні. Павловнія може добре рости навіть на сильно засолених ґрунтах та на ґрунтах, бідних на поживні речовини, де її здатність вибірково поглинати іони Ca++ та Mg++ дає їй перевагу. Завдяки своїй морозостійкості, павловнія з великим успіхом використовується в проектах рекультивації шахт. Як згадувалося вище, павловнія дуже чутлива до затоплення та потребує хорошого дренажу. Їй потрібно від 500 мм до 2600 мм опадів на рік, хоча вона може переносити й менше, якщо більшість опадів випадає протягом вегетаційного періоду. Саджанці слід поливати в день посадки та знову

через кілька днів. Дерево слід добре зрошувати, доки воно не сформує достатню кореневу систему; мульчування може допомогти мінімізувати втрати через випаровування протягом теплого сезону. Павловнія не дуже чутлива до атмосферної вологості. Павловнія – світлолюбна рослина-піонер; невелике затінення може спричинити деформацію саджанців, а 70% затінення може бути смертельним для молодих дерев. Вкрай важливо проводити ефективне прополювання протягом першого року, щоб бур'яни не переростали молоді дерева; настійно рекомендується мульчування. Підстригання – це процес зрізання дерева до рівня землі, щоб сприяти утворенню нового пагона. Обрізку слід починати на другий або третій рік і проводити протягом усього вегетаційного періоду, коли з'являються нові гілки. Непотрібні бічні гілки слід видаляти; проте гілки крони не слід обрізати протягом року їх появи, оскільки вони утворюватимуть симподіальне продовження стовбура. Тільки перші 7-8 метрів стовбура потрібно тримати чистими від гілок; після цього кроні можна дозволити прийняти свою природну форму. Павловнія – це плідна пагона; тому рекомендується проводити підстригання дерев, бажано протягом другого року. Дерева слід підстригати пізньою весною, безпосередньо перед початком вегетаційного періоду. Саджанці з коротким стовбуром або саджанці з погано сформованими стовбурами слід зрізати трохи вище третьої бруньки навесні другого року, безпосередньо перед появою нового листя; з нижніх бруньок проросте новий, прямий, добре сформований стовбур.

Переваги павловнії як рослини для виробництва біопалива полягають у наступному:а) павловнія може рости на піщаному та бідному ґрунті; тому вона не конкурує з сільськогосподарськими культурами за родючі землі; б) вирощування павловнії не вимагає багато догляду та має низьку вартість; в)пересадка не потрібна оскільки після обрізання рослини швидко відновлюються, тривалість життя коренів становить приблизно 70 років і можуть підтримувати ріст близько 8-9 живців з вегетативним циклом близько 8 років. Для виробництва біомаси рекомендується більш щільний посів для виробництва деревини (550-750 дерев/га). Перевага надається рослинам з густотою 2000 рослин/га, у Болгарії висаджують плантації для біомаси з густотою 3000-3300 рослин/га на відстанях 3,3 х 1 м та 2 х 1,5 м відповідно. Вид вважається придатним для покращення покинутих

сільськогосподарських угідь або для рекультивації земель, де основна мета зосереджена на виробництві біомаси.

Paulownia Clon in Vitro 112 (гібрид Paulownia elongata × fortunei), розроблена іспанською компанією In Vitro S.L. Дерева цього клону засвоюють більше CO_2, ніж інші таксони роду Paulownia, і, як наслідок, виробляють більше O_2, що й отримало назву «Oxytree» (Оксидерево), комерційну назву, надану Carbon Solutions Global Ltd. у 2016 році Надзвичайно швидкозростаюче Oxytree було представлено в Польщі у 2015 році та розглядається як альтернатива у виробництві біомаси, деревини, целюлози, а також у процесах відновлення ґрунтів, що експлуатуються під час видобутку корисних копалин. Поряд з тополею та вербою, рослини роду Paulownia зазвичай описуються як хороші кандидати для фіторемедіації завдяки їхній стійкості до високих концентрацій металів, швидкому росту та, перш за все, високому виробництву біомаси. Цей аспект був описаний для окремих гібридів і найчастіше стосується допоміжної фіторемедіації з використанням певних агентів, що додаються до субстрату. Дерева роду Paulownia можуть бути придатними для фітоекстракції металів завдяки своїй належності до групи рослин C_4, чиє високовідновне внутрішнє середовище клітин запобігає окислювальному перетворенню металів. У рамках численних досліджень у цій галузі було виявлено значні відмінності у фітоекстракції шкідливих елементів. У ґрунті, сильно забрудненому сполуками міді, гібрид Paulownia elongata × fortunei продемонстрував хорошу стійкість і знизив вміст Cu у ґрунті на 17% (Drzewiecka et al., 2021). Було виявлено, що додавання ЕДТА викликало значно більше поглинання металів порівняно з цитратом. Також звертається увага на використання грибів або торфу як стимулюючих ріст агентів, що впливають на потенціал фітоекстракції павловнії. Крім того, павловнія досі досліджувалася лише обмежено на відходах гірничодобувної промисловості, і бракує широких досліджень щодо накопичення благородних або рідкісноземельних елементів. Однак, коефіцієнти біоконцентрації та транслокації, що перевищують одиницю для поширених металевих забруднювачів, таких як Cd, Cu, Pb та Zn, роблять павловнію дедалі привабливішим об'єктом дослідження. Було показано, що під час ревегетації нерухомість та біодоступність важких металів посилювалися в ґрунтах ризосфери Paulownia fortunei. Було задокументовано ефективне зниження навантаження

металів у ґрунті за допомогою Paulownia tomentosa, майже в 2 рази вище, ніж для Cytisus scoparius або Populus alba (Drzewiecka et al., 2021).. Також було описано високий потенціал двох ліній павловнії з чіткою диференціацією у фітоекстракції Pb та Zn. Тим не менш, попри цінні морфологічні особливості та значно вищі фіторемедіативні здібності, ніж у більшості деревних негіперакумуляторів, практичне використання павловнії явно обмежене через те, що немісцеві дерева зараз займають чільне місце у списках інвазійних рослин у багатьох частинах світу. Можливості використання роду павловнії можна побачити у таких гібридах, як Paulownia elogata × fortunei, які дають нежиттєздатне насіння та обмежують ризики інвазії. Ріст рослин на забрудненому ґрунті вже проблематичний на стадії адаптації, коли рослина контактує з високими концентраціями токсичних елементів. Перспективним рішенням, запропонованим у кількох роботах, є використання біовугілля. Багато досліджень повідомляють, що біовугілля ефективно використовується для іммобілізації метал(лоїдів) у забруднених ґрунтах та впливає на їх біодоступність та біодоступність для рослин. Біоремедіація з використанням біовугілля є однією з критично важливих технологій ремедіації ґрунтів, забруднених метал(лоїдами). Фіторемедіація з використанням біовугілля демонструє чудовий потенціал для іммобілізації катіонних метал(оїдів) у відходах шахт та хвостосховищах, особливо з високою кислотністю. Помірна питома поверхня біовугілля та pH вище 9,0 можуть допомогти рослинам вижити в нових несприятливих умовах росту шляхом зниження концентрації токсичних елементів у ризосфері та їх поступового дозування. Біовугілля також може покращити родючість ґрунту та відновлення рослинності, а також створити сприятливе середовище для різноманітності ґрунтових мікробів. Потенційними перевагами біовугілля для фіторемедіації є (1) фізична адсорбція катіонних метал(оїдів) з порової води ґрунту; (2) (спів)осадження з фосфатами, карбонатами, силікатом та хлоридом, наприклад, утворення піроморфіту; (3) комплексоутворення з функціональні групи на поверхні біовугілля; та (4) вивільнення поживних речовин, таких як N, P, K, Ca. Процеси (1)–(3) можуть зменшити біодоступні концентрації металів у воді ґрунтових пор та додатково мінімізувати фітотоксичність. Процес (4) може виробляти поживні речовини для коренів рослин та мікроорганізмів у ризосфері, що є вирішальним моментом у розробці економічно ефективних

стратегій відновлення. Пошук рослин, здатних до адаптації та росту на постпромислових відходах, є необхідним через необхідність деконтамінації забруднених матриць та їх використання у фітодобутку. Використання видів, визнаних наразі інвазивними, хоча в контексті прогресуючої зміни клімату потенційно неінвазивними видами в майбутньому, видається раціональним, за умови, що ці рослини характеризуються високою стійкістю та накопиченням забруднюючих речовин під час росту на відходах з помірною концентрацією токсичних елементів.

Як і будь-яка рослина, павловнія може хворіти та є сприйнятливою до різних патогенів. Найвідомішою хворобою павловнії є «відьмина мітла», яка спостерігається в Китаї протягом багатьох років. Сучасні дослідження визначили фітоплазму (паразита), яка бути збудником хвороби «відьомської мітли», яка потенційно передається між деревами павловнії. Механізм дії, ймовірно, пов'язаний зі змінами експресії генів у відповідь на фітоплазму. Відьмина мітла – це інфекційне мікоплазмове захворювання, яке погіршує ріст дорослих дерев і може бути смертельним для молодих. Пазушні та додаткові бруньки проростають у великій кількості, утворюючи пучки маленьких гілочок, які не опадають протягом зими (це «відьмина мітла»). Міжвузля на стовбурі ущільнюються. Листя зморщуються та стають дрібними, тонкими та жовтими з прозорими прожилками. Квітка: Пелюстки стають листоподібними. Рекомендоване лікування: Уражені дерева слід видалити з місця посадки та спалити. Уражені гілки на здорових деревах слід зрізати та спалити; рани слід обробити маззю з терраміцину та вазеліну (1:9) та обгорнути тканиною. Деякі дослідження припускають, що у сорту *P. tomentosa* × *P. Fortunei, який вирощують в Україні,* може бути генетична стійкість до цієї хвороби.

Антракноз – це серйозне грибкове захворювання, яке вражає саджанці; зазвичай воно не є летальним. Спори проростають при температурі 25°C та відносній вологості 90-100%. Уражені листя мають бліді плями, які збільшуються в коричневі круглі плями, оточені жовто-зеленою тканиною. Плями пізніше розтріскуються в центрі, і заражене листя рано опадає. На плямах після дощу або у вологому кліматі часто з'являються купи червоних конідій.Рекомендоване лікування: антракнозу можна запобігти, згрібаючи та знищуючи опале листя та

гілочки, а також обрізаючи мертві гілки дерева. У випадках, коли хвороба викликає повторне опадання листя або зараження відбувається на рослинах, які зазнають стресу, можна використовувати хімічну обробку тіофанат-метилом, манкоцебом, бордоською сумішшю або іншими мідними фунгіцидами. Перше обприскування слід проводити навесні, коли бруньки починають набухати, а потім проводити два-три додаткові обприскування з інтервалом 10-14 днів. Крім того, були виявлені інші хвороби, такі як фітофтороз кореневої та шийкової гнилі, та гниль, спричинена *Trametes hirsuta*. Нещодавні повідомлення вказують на наявність нематод (Meloidogyne hapla) у коренях P. tomentosa у Польщі (Lisowski & Porwisiak, 2020).

1.3. Властивості та використання деревини павловнії

Павловнії мають світло-жовту або світло-червону серцевину. Межа між заболонню та серцевиною нечітко визначена. Заболонь дуже вузька і зазвичай містить одне або два річні кільця. Річні кільця чітко видно на всіх поперечних зрізах. Деревина має кільцепористу або напівкільцепористу структуру. Судини або ледь помітні, або взагалі не помітні, а деревні промені видно лише під збільшенням. Судини мають овальну форму і їх можна розділити на судини ранньої деревини та судини пізньої деревини, останні в 3-10 разів менші. Оточені широкою смугою паренхіми різної форми, промені вузькі, зазвичай займають один ряд висотою до 0,5 мм. Ядро деревини чутливе до зміни кольору. Кілька факторів можуть спричинити такі зміни кольору, які можна розділити на три групи: хімічне знебарвлення, мікробне знебарвлення та фотознебарвлення. Старіння деревини також викликає чіткі зміни кольору, причому природні зміни менш помітні, ніж ті, що викликані штучно ультрафіолетовим світлом або високою температурою. Загальновідомо, що термічна модифікація викликає подібні зміни кольору в інших породах деревини.

За своїми фізичними та механічними властивостями павловнії найбільше схожі на верби та тополі. Однак результати багатьох робіт з цієї теми стосуються різного походження та місця вирощування культур. У проведених експериментах часто використовувалися різні методологічні припущення; тому результати іноді важко порівнювати. Щільність деревини павловнії з вмістом вологи 12%

коливається від 220 до 350 кг м−3, але найчастіше коливається близько 270 кг/м^3. Мінливість щільності деревини павловнії зумовлена головним чином різними умовами росту, хоча вона відрізняється між видами *P. tomentosa, P. elongata* та *P. fortunei*, причому дещо вища щільність зазвичай приписується *P. tomentosa*. Статична міцність деревини павловнії на вигин коливається від 23,98 до 43,56 МПа, залежно від виду, тоді як модуль пружності коливається від 2651 до 4917 МПа, або навіть до 5900 МПа для P. tomentosa. У випробуваннях як на деревах, що стоять, так і на колодах, проведених неруйнівними методами, повідомлялося про вищий модуль пружності для дерев більшого діаметра. Було виявлено, що фізичні та механічні властивості павловнії зазнають низки змін під час сушіння пиломатеріалів. Залежно від використаного технологічного процесу, ці зміни можуть бути як дуже значними, так і незначними. Павловнії мають високий коефіцієнт міцності та якості, що відповідає високому співвідношенню міцності до щільності. Для конкретних застосувань це дуже корисний параметр, особливо там, де потрібні дуже легкі, але міцні конструкції, наприклад, у композитних будівельних панелях. Усі ці дані щодо деревини павловнії вказують на досить широкі відмінності у властивостях різних видів; тому, коли йдеться про деревину павловнії, важливо мати на увазі конкретний вид.

Виробництво деревини в короткострокових культурах шляхом посадки швидкозростаючих енергійних культур сприяє збереженню природних екосистем. Використання екзотичних рослин з цієї причини може бути адекватним, оскільки зазвичай вони демонструють хороший продуктивний потенціал для нових сільськогосподарських угідь. Головною перевагою використання біомаси як палива є її стійкість. Деревна біомаса лісів, модифікована для високого вмісту целюлози та геміцелюлози, може бути основним джерелом виробництва етанолу. Аналізи деревної суміші павловнії показують, що вона містить: 14,0% екстракту, 50,55% целюлози, 21,36% лігніну, 131,6% геміцелюлози та 0,49% золи. Присутність лігніну, геміцелюлози та целюлози в деревині павловнії порівнянна з такою в твердих порід деревини (Ates et al., 2008). Завдяки високому вмісту целюлози, целюлозу павловнії можна використовувати для виробництва етанолу, який є відновлюваним біопаливом, що зменшує викиди парникових газів у навколишнє середовище. Американські дослідники створили нові термохімічні та

біотехнологічні технології, за допомогою яких можна витягти 511 літрів етанолу з 1 тонни сухої маси, саме тому павловнію вважають «нафтовою свердловиною». Павловнія — дуже швидкозростаюча рослина, дерева можуть досягати 4–6 м лише протягом першого року (після зрізання), виростаючи ще на 2–3 м протягом другого року, досягаючи діаметра стовбура 20–25 см на висоті грудей у чотири роки. Калорійність біомаси павловнії вища, ніж у вугілля (та лісової біомаси), нижча за вміст забруднювачів повітря, таких як сірка, менша за вмістом сполук порівняно з іншими біомасами, а також швидкий коефіцієнт росту та відновлюваність роблять цю рослину придатною для екологічної прибутковості. Деревина павловнії має перевагу в тому, що вона легка, що знижує витрати на транспортування порівняно з іншими породами деревини. Павловнію можна зрізати щонайменше 4-5 разів, а її ріст покращує якість ґрунту краще, ніж інші системи біомаси. Павловнію як джерело енергії використовують для виробництва пелет (як тверде паливо) та інших відповідних форм біопалива, використовуючи таким чином кожну частину рослини.

Перші описи традицій, пов'язаних з використанням деревини павловнії, датуються кількома століттями до нашої ери. Дерево використовувалося в релігійних та медичних цілях і мало високу повагу, асоціюючись з народженням і смертю. З цим деревом пов'язано багато легенд, головним чином у Китаї та Японії. Широке культивування павловнії відоме з третього століття нашої ери. Сьогодні деревину часто використовують завдяки її популярності та здатності рости в широкому діапазоні умов. Деревина павловнії використовується у виробництві фанери, інженерної деревини (крім будівельної), паперу, шпону, різьблення, сабо, меблів та кухонних предметів, таких як горщики для рису, відра для води, миски, ложки та палички. Часто згадується використання деревини павловнії у виробництві музичних інструментів. Специфічні акустичні параметри, яких немає в ялиновій деревині, можуть призвести до її заміни павловнією в деяких інструментах, що призведе до появи нових звуків. Однак, як матеріал, який може підійти для музичних інструментів, деревина павловнії не дуже добре підходить як звукопоглинач. Павловнії мають великі судини, але низьку наскрізну пористість через велику кількість тилозів у судинах. Тому газопроникність низька, а звукопоглинання погане. Це знижує її якість як звукоізоляційного матеріалу

порівняно з бальзою або бінуангом. Це також обмежує використання павловнії в тих випадках, коли потрібне насичення деревини.Одним із рішень цієї проблеми є термічна модифікація деревини. Газопроникність і коефіцієнт звукопоглинання термічно обробленої P. tomentosa збільшується в результаті термічної обробки залежно від температури. Такогож ефекту можна досягти застосувавши гідротермічно оброблену павловнію для звукопоглинальних плит у житловому будівництві. Надкритична обробка CO_2 значно покращувала газопроникність P. Fortunei. Випробування на придатність у виробництві олівців та крейди також були позитивними, причому випробування, що порівнювали деревину павловнії (P. elongata) з тополею (Populus tremula) та ялівцем (Juniperus excelsa), які зазвичай використовуються в цих продуктах, показали великі перспективи з точки зору властивостей деревини (Kaygin et al., 2015). На відміну від лісівничих міркувань щодо павловнії, оцінка деревообробної технології цього ресурсу є чіткою. Надзвичайно низька щільність павловнії 261 кг/м³ призводить до високої пористості близько 83% та відповідного відсотка клітинних стінок 17%. Точка насичення клітковиною є високою і становить 31,15%, а клітинна стінка складається з наступного: голоцелюлоза (80,1%), целюлоза (51%), лігнін (23,5%) та екстрактивні речовини (11,8%). Швидкозростаючі породи дерев були висаджені в плантаціях з короткою ротацією. Окрім різних видів дерев, таких як тополя європейська (Populus spp.) та верба (Salix L.), також використовувалися такі рослини, як міскантус (Miscanthus Andersson). Павловнія має чудові показники щодо приросту об'єму на рік та на гектар. Як піонерний вид, павловнія забезпечує переваги з точки зору стабільності насаджень та нечутливості до атак шкідників на складних ґрунтах. Однак, принаймні деякі гібриди павловнії відстають від інших видів за виробництвом біомаси. Ще одним недоліком павловнії для виробництва енергетичної деревини є висока вартість рослинного матеріалу та вимоги до догляду, а також низька морозостійкість. Целюлозно-паперові властивості павловнії вважаються недоліками через низький вміст целюлози та властивості волокна (Ates et al. 2008), хоча значних покращень можна досягти, регулюючи процес варіння целюлози (García et al. 2011). Згідно з цим дослідженням, середня довжина та ширина волокна становили 996 та 30,55 мкм відповідно. Діаметр просвіту становив 25,3 мкм, а середня товщина клітинної стінки – 5,25 мкм. Завдяки

своїй низькій вазі ця порода деревини особливо підходить для легкого будівництва. Для рішень з масиву деревини та її використання як частини деревного композиту необхідно визначити властивості матеріалу та технологічну оброблюваність павловнії.

Корисність P. tomentosa в целюлозно-паперовій промисловості була відзначена десятиліття тому в США. Однак було зазначено, що волокна павловнії короткі та підходять лише для певних сортів паперу. Сучасні дослідження підтвердили ці знання в ширшому контексті. Встановлено, що розміри волокон набувають значень, типових для листяних видів, що використовуються в цій галузі. Однак, завжди важливо пам'ятати про конкретний вид, про який йде мова, оскільки, хоча довжина волокон різних видів павловнії схожа і коливається від 0,82 до 1,002 мм, товщина клітинної стінки значно варіюється. Наприклад, середня товщина клітинної стінки волокна може коливатися від 3,8 до 8,6 мкм у різних видів павловнії. Високий вміст целюлози (47,85%) робить її корисною для целюлозно-паперової промисловості, як зазначають Придатність павловнії для виробництва целюлози була вдосконалена з метою отримання лігноцелюлозної біомаси для палива, розчинників та хімікатів тощо. Через короткі виробничі цикли деревини павловнії можна використовувати як стеблову, так і гілочну деревину, хоча остання має меншу цінність і часто супроводжується реакційною деревиною; проте її можна використовувати у виробництві паперу, наноцелюлози, деревного вугілля та інших галузей.

Сьогодні плантації павловнії, орієнтовані на виробництво біомаси, набувають все більшої популярності (Magar et al., 2018). Це дерево може виробляти стільки ж біомаси за рік, скільки інші види за кілька років. Відповідні гібриди найкраще працюють у цій галузі, але відмінності між гібридами та регіонами, де проводилися експерименти, досить значні. Дослідження показали, що, наприклад, клон Cotevisia 2, вирощений в Іспанії, має в 1,8 раза вищу продуктивність, ніж клон Suntzu 11. Однак у двох із шести досліджених місць саме Suntzu показав вищу продуктивність. Обидва клони в 2-річному експерименті показали рекордну продуктивність у регіоні Вільянуева-дель-Ріо-і-Мінас (провінція Севілья, Іспанія), де з гектара було зібрано від 7,2 до 14 тонн сухої речовини (тобто 3,2 та 7,4 тонни вуглецю відповідно). Ті ж клони в іншому регіоні Іспанії (Кордова) показали

продуктивність від 1,7 до 2,3 т сухої речовини. Для порівняння, 16-річний експеримент, проведений на P. tomentosa в Азії, дав 38,8 т вуглецю га−1, тоді як 21-річний експеримент дав понад 105 т вуглецю га$^{-1}$. Досвід інших дослідників також показав, що виробництво біомаси значною мірою залежить від гібрида, який використовується для культури. 5-річний експеримент, у якому порівнювали продуктивність двох павловній, інтродукованих до Болгарії, показав, що найкращі результати отримані в південно-західній частині країни (Yavorov et al., 2015). Paulownia tomentosa мала вищу продуктивність 3,479 т га$^{-1}$ (висушена в печі біомаса) після 2 років вирощування та 36,995 т га$^{-1}$ після 4 років, тоді як продуктивність P. elongata × P. fortunei становила 2,730 т га$^{-1}$ після 2 років та 19,964 т га$^{-1}$ після 4 років. На деградованих ґрунтах павловнії демонструють дуже низькі темпи росту. У 3-річному дослідженні в Іспанії було досягнуто врожайності біомаси P. fortunei лише 3,34 т га$^{-1}$, що було дуже низьким порівняно з паралельно вирощеним Eucalyptus globulus (40,4 т га$^{-1}$). Як дерево з високими темпами росту, але низькою щільністю деревини, павловнія не дуже добре справляється з виробництвом ефективного палива. Порівняння пелет, вироблених з молодих плантацій P. elongata × P. fortunei, за європейськими стандартами, показало їхню низьку якість порівняно з пелетами Pinus radiata та Eucalyptus nitens. Однак в іншому дослідженні, що оцінювало виробництво брикетів та пелет з тирси, було отримано задовільні енергетичні ефекти для P. tomentosa та P. elongata. Сучасні економіки потребують набагато швидших результатів, ніж ті, що можна отримати за багаторічним спостереженням під час різних експериментів. Певною мірою цей процес можна прискорити, і вже прискорився, шляхом побудови математичних моделей та прогнозування розвитку сільськогосподарських культур за різних місцевих умов. Як показав досвід, такі моделі мають велике майбутнє та можуть виявляти сприятливі та несприятливі явища на ранній стадії. Всановлено, що більша частина біомаси накопичується у стовбурі, і лише 35% молодих дерев мають гілки. Впровадження павловнії як важливого елемента у виробництві біомаси потребує особливої уваги в країнах зі сприятливими умовами для вирощування гібридів, які можуть бути конкурентоспроможними з місцевими видами. Дослідження в цій галузі тривають і Україні (Kaletnik et al, 2021; Morozova

et al, 2021)

Наразі проводиться багато досліджень, спрямованих на подальше використання деревини павловнії у виробництві деревних пластмас та композитів, а також у виробництві біополімерів. Деревина павловнії також добре підходить для виробництва столярних плит, які діють як серцевинний шар між шпонами, та як інгредієнт для виробництва легких деревостружкових плит. Її також можна піддавати термічній модифікації або покращувати іншими методами, такими як обробка високим тиском, що добре працює для деревини низької щільності, такої як павловнія. Деревина павловнії може піддаватися піролізу та перетворенню на гази як джерело енергії і може використовуватися як сировина для виробництва біоетанолу. Також ведеться робота з вивчення використання відходів павловнії як субстрату для виробництва біоводню. Окрім деревини, решта частин рослини, такі як листя та квіти, можуть використовуватися в лікувальних цілях та як джерело їжі для тварин. Традиційне використання деревини для виготовлення меблів та ширшої механічної обробки досить обмежене природним поширенням видів павловнії та місцями, де дерева павловнії досягають великих розмірів. Спроби використання видів павловнії для фіторемедіації важких металів у забруднених ґрунтах показали значне накопичення металів, таких як мідь, цинк та кадмій, хоча це було пов'язано з їх високою продуктивністю біомаси, а не з їхнім потенціалом накопичення металів. Інше дослідження виявило значну різницю в накопиченні свинцю та цинку між різними гібридами.

1.4. Ризики та перспективи вирощування павловнії в Україні

Павловнія, незважаючи на її потенціал для деревообробної промисловості та перспективні матеріальні властивості, не була схвалена як лісова рослина в Австрії, Чехії, застережена до повномасштабного впровадження в Польщі. В цих випадках посадка відбувається виключно на контрольованих плантаціях. Хоча з'являється все більше публікацій про агресивні неофіти, більшість робіт зосереджена на

інвазивній природі павловнії та варіантах контролю та стримування поширення цієї немісцевої породи деревини. Усі немісцеві види рослин, які були інтродуковані внаслідок діяльності людини до 1492 року, називаються «археофітами». Якщо вони були інтродуковані після 1492 року, їх називають «інвазивними». Коли ці немісцеві види мають небажаний вплив на місцеві види, їхні спільноти чи біотопи, їх називають «інвазивними». У випадку неофітів необхідно чітко розрізняти види, дозволені лісовим та культивовані в лісових районах та інвазивні види або види, які не дозволені. Вважається, що вид вважається інвазивним, якщо він становить реальну та очевидну загрозу і не може бути контрольований лісівничими чи іншими заходами, або якщо заходи контролю були б занадто дорогими. Тут важливими є зусилля, необхідні для контролю поширення виду. Необхідно враховувати особливості виду, такі як розселення, конкуренція та репродуктивна поведінка, а також їхній вплив на інші види на відповідному місці. За деякими даними потенціал розселення павловнії можна охарактеризувати як високий або експансивний, але темпи її розселення не природні, а супроводжуються бажанням людини її розмножувати. Вважається, що зміна клімату ще більше збільшить ризик поширення вирощування павловнії , а значить створить певний ризик для тствоpення плантацій з місцевих видів дерев. Отже, необхідні подальші дослідження для оцінки «довгострокових ризиків поширення перспективних культур в напівприродних середовищах існування» неофітами. У Північній Америці, де павловнія вважається високоінвазивною після масштабних порушень, таких як пожежі, витіснення охоронюваних місцевих видів рослин вже відбулося на бідних на поживні речовини та сухих ділянках. Збільшення тиску інвазивності, ймовірно, пов'язане з масштабним вирощуванням павловнії у 1970-х та 1980-х роках для виробництва цінної деревини (Zhao-Hua et al. 1986). У Центральній Європі за природних умов павловнія поширюється переважно на екстремальних ділянках, які можуть бути колонізовані кількома іншими місцевими видами. Тому, близькі до природних екосистеми ще не постраждали від її поширення. Однак у Швейцарії спостерігали, що павловнія поширюється в перелісових лісах та на лісових вирубках. Можливо, що наближені до природних екосистеми Європи також зазнають більшого тиску в майбутньому, оскільки площі оброблюваних культур значно зростуть, від окремих дерев павловнії, спочатку посаджених у садах

і парках, до масштабного вирощування на плантаціях з короткою ротацією та в агролісівництві.

Кліматичні моделі, спроектовані Міжурядовою групою експертів зі зміни клімату (МГЕЗК), призводять до виникненню ризику підвищення температур повітря на Землі. Підвищення температури у вегетаційний період буде корисним для чутливих до морозу видів павловнії (P. elongata S.Y.Hu, P. fortunei (Seemann) Hemsley та P. tomentosa (Thunb.) Steud.) (Zhao-Hua et al. 1986). Крім того, інші сорти можна адаптувати до умов вирощування в Центральній Європі. Найпоширенішим і найкраще вивченим видом павловнії в Європі є P. tomentosa (Thunb.) Steud. Вона є найбільш морозостійкою серед видів павловнії, витримуючи широкий діапазон температур від -20 °C до +40 °C. За гарного освітлення, поживних умов та достатнього водопостачання вона може досягати надзвичайно високих темпів росту. Її оптимальний ріст спостерігається протягом тривалих теплих періодів при середньодобових температурах від 24 до 29 °C. За вищих температур рослинам потрібно більше води. Однак у Центральній та Східній Європі кількість опадів обмежена під час спекотних періодів. Таким чином, посухи у вегетаційний період також мають сильний негативний вплив на ріст Павловнії. Несприятливі погодні умови, особливо під час фази вкорінення, негативно впливають на виживання розсади та призводять до високого рівня відмов. Щоб уникнути водного стресу, рекомендувано регулярне штучне зрошення з тижневими інтервалами. Однак, за жодних обставин, не слід може статися перезволоження, оскільки це може призвести до загибелі молодих рослин вже через три-чотири дні. Завдяки своєму піонерському характеру та високим темпам росту, цей вид підходить для рекультивації колишніх відкритих кар'єрів, де він служить захистом від ерозії та сприяє покращенню ґрунту завдяки високому вмісту азоту в листовому опаді. Завдяки своїй глибокій кореневій системі він може поглинати багато поживних речовин за короткий час і тому має хороший потенціал для відновлення ґрунту. У Китаї дерево навіть використовується як проміжна культура при вирощуванні пшениці. Використання його біомаси поширюється не лише на деревину, а й на листя та квіти дерева. Молоді саджанці павловнії стійкі до поширених лісових грибів. Навіть у своєму природному середовищі ці дерева зазвичай схильні рости у свіжих вирубках лісів, наприклад, після пожеж. Як молода рослина, P. tomentosa

(Thunb.) Steud. порівняно слабка в конкуренції з іншими видами, якщо швидкий ріст її листового пологу не призводить до затемнення навколишньої наземної рослинності на ранній стадії. P. tomentosa (Thunb.) Steud. – це ранній сукцесійний вид, який швидко витісняється пізнішими, більш тіньостійкими видами. У закритих насадженнях він більше не може відновлюватися, оскільки залежить від відкритого ґрунтового субстрату без підстилки для проростання. При цьому його листовий опад не тільки знижує швидкість проростання не лише інших видів, але й власного виду. Як уже зазначалося, ріст дерев відбувається швидко, а отримана деревина має надзвичайно низьку щільність. Тому деревина «європейська бальза» виправдана як прізвисько для павловнії. Перші плантації були засновані в 2009 році компанією WeGrow GmbH у Німеччині. У 2012 році австрійська компанія Plantownia GesbR розпочала свої перші випробування культивації на плантаціях для виробництва цінної деревини в Австрії. Наразі плантації павловнії в Австрії невеликі (0,1–5 га), і вони використовуються фермерами для отримання досвіду у вирощуванні цього наразі відносно невідомого дерева. Вважається, що більшість цих плантацій виробляють високоякісну деревину (тобто класу A або B). Цей метод вирощування є порівняно трудомістким. Вирощування деревини павловнії як джерела біомаси та енергії наразі є рідкістю, і його випробування проводилися лише на окремих невеликих плантаціях площею менше 0,1 га. В Австрії очікується, що перший значний збір деревини павловнії (діаметром на висоті грудей приблизно 35 см) очікується у 2026 році. Умови вирощування були оптимізовані в останні роки, і протоколи плантацій виявилися успішними щодо оптимізованих темпів росту та якості деревини. Щодо кліматології, оптимізований ріст відбувається при річній кількості опадів приблизно 700 мм. Протягом перших років плантації може знадобитися зрошення в умовах сухої погоди, щоб забезпечити початковий ріст. Через два-три роки дерево з глибоким корінням стає більш стійким до посухи, і спорадичне зрошення потрібне лише в екстремальних посушливих умовах (наприклад, відсутність дощу протягом кількох місяців у поєднанні з піщаним ґрунтом). Єдиними шкідниками, які завдають шкоди молодим деревам, є популяції мишей, які потребують щорічних контрзаходів. Після збору врожаю дерево можна знову виростити, проростаючи з існуючої кореневої системи, яка порівнянна з його кроною. Це гарантує швидке зростання другого врожаю, включаючи вищу

стійкість до посухи. Незважаючи на проблеми та труднощі, пов'язані з вирощуванням Щодо неофітів, зміна клімату вимагає критичного аналізу концепцій управління лісами та забезпечення ресурсами круглої деревини, які досі діяли в Європі. Неофіти можуть мати потенціал для компенсації втрати місцевих дерев через посуху та нашестя жуків, особливо ялини звичайної (Picea abies (L.) H.Karst.). Водночас, через зростання кількості екологічних небезпек, важливо забезпечити, щоб нові лісівничі концепції не спричиняли додаткових проблем(Пилипенко та ін., 2010). Попередні дослідження в літературі щодо технологічного потенціалу неофітів недостатньо розглядали або всебічно оцінювали переваги, недоліки, можливості та ризики, пов'язані з культивуванням цих дерев (Фурдичко, 2014). Екологічні оцінки павловнії в європейських та північноамериканських регіонах стосовно ризику інвазійного поширення P. tomentosa (Thunb.) Steud. не надали свідчень для твердження про її інвазивність у лісових районах. Існуючи ознаки інвазивної поведінки, як-от у Сполучених Штатах не можна легко перенести на умови Центральної Європи, оскільки небезпека неконтрольованого поширення павловнії в Центральній Європі вважається малоймовірною через її характеристики росту. Тому, порівняно з айлантом райським (Ailanthus altissima (Mill.) Swingle), павловнія вважається менш інвазивною та агресивною. У пошуках стратегії майбутнього адаптованого лісового господарства, при виборі видів дерев необхідно враховувати потенційні природні лісові угруповання, тобто ті, що розвиваються без лісівничих втручань (Фурдичко та Тимочко, 2020). Слід уникати пошкодження місцевих видів дерев інвазивними неофітами. Таким чином, заборона на вирощування таких видів у лісових районах є виправданою, при цьому оцінки ризиків повинні бути регіонально пов'язані з відповідними ділянками (Стадник, 2018; Висоцька Н.Ю. та ін., 2019). При оцінці використання неофітів також необхідно враховувати безпечне постачання круглого лісу для лісової промисловості, оскільки ця галузь має велике економічне значення для Центральної Європи, зокрема тому, що вона забезпечує численні робочі місця. Плантації можуть бути можливим вирішенням цієї дилеми (Соломаха та Шевчик, 2020). Потенціал чужорідних лісових рослин можна було б дослідити в розмежованих зонах. Особливо у випадку лісових рослин з коротким періодом ротації можна швидко зібрати достатньо інформації, щоб визначити, чи

можна використовувати менш трудомістку плантацію в лісових районах. У випадку павловнії період ротації становить лише сім років. Досвід показав, що чисті види, такі як P. tomentosa та навіть P. fortunei, є інвазивними, тому лише деякі гібриди були прийняті до масового культивування. Враховуючи відповідні регіони, найкращі умови для вирощування гібридів павловнії знаходяться в південній Європі, зокрема в Іспанії, Португалії, Італії та на Балканах, а також у країнах Близького Сходу, таких як Туреччина та Іран, де умови також набагато кращі, ніж у країнах північніше.

Отже, кількість позитивного досвіду свідчить про великий потенціал павловнії, який, однак, сильно варіюється на місцевому рівні. Зазначені технічні параметри, хімічний склад, вимоги до умов вирощування та виробництва біомаси павловнії суттєво відрізняються між різними видами та гібридами. Значення, отримані з опублікованих досліджень, іноді відрізняються на кілька десятків відсотків. Щоразу випробування має визначити придатність вибраного виду або гібрида павловнії для кожної конкретної мети.

2.ГРУНТОВО-КЛІМАТИЧНА ОЦІНКА РАЙОНУ ДОСЛІДЖЕНЬ

Територія України характеризується частою зміною повітряних мас як у холодний, так і в теплий періоди, що спричиняється активними циклонами та антициклонами різного географічного походження та напрямків, що призводить до значних просторово-часових варіацій метеорологічних характеристик. Степові регіони України належать до холодного напівпосушливого клімату. Україна має багатий запас родючих ґрунтів, тому може бути одним з європейських лідерів у виробництві високоякісних, екологічно чистих продуктів харчування. Ґрунт є одним з основних природних засобів виробництва продуктів харчування. Найбільш родючими грунтами є чорноземи звичайні. Друге місце посідають чорноземи південні, які розповсюджені на півдні Дніпропетровської області.

Вологість ґрунту та температура є основними фізичними властивостями ґрунтів, що визначають їх родючість. Вологість ґрунту впливає на розчинність, переміщення та ефективність органічних та мінеральних добрив, ступінь забруднення ґрунту пестицидами та іншими продуктами техногенного походження, а також на те, скільки сільськогосподарські рослини поглинають хімічні речовини, шкідливі для здоров'я людини. Дефіцит вологи ґрунту на півдні Дніпропетровської області є одним з основних факторів у сільськогосподарському виробництві, що обмежує врожайність і призводить до негативних змін якості продукції в Нікопольському, Томаківському, Софієвському та Широківському районах. Саме тому там була побудована в свій час Інгулецька зрошувальна система. Після руйнування Каховської ГЕС ця система перестала працювати. Будівля тимчасових водогонів перекачки води з Дніпровського водосховища поки не задовольняє потреби фермерів.

Під час аналізу водного режиму ґрунту враховуються два основні моменти: (1) динаміка продуктивної вологи в метровому шарі ґрунту; (2) розподіл вмісту вологи в ґрунтовому профілі. Вологість ґрунту не має яскраво вираженого ходу. Випаровування та транспірація, що відповідають за швидкість вилучення води з ґрунту під час висихання, зазнають добових коливань. Однак ці коливання мало впливають на загальний баланс. Вологість ґрунту досить швидко зростає під час

опадів або зрошення та повільно знижується між періодами опадів та/та зрошення.Це зменшення частково зумовлене гравітаційним потоком води, але здебільшого транспірацією та поверхневим випаровуванням. Залежно від балансу опадів і транспірації, коливання вологості ґрунту характеризуються досить тривалими періодами (десятиліття, місяць). Стан вологості ґрунту регулює початок посухи та її прогресування, тоді як дефіцит вологи ґрунту є добрим показником сільськогосподарської посухи та її інтенсивності. Сільськогосподарська посуха (також відома як ґрунтова посуха) характеризується нестачею ґрунтової вологи, що призводить до стресу рослин, зниження біопродуктивності та врожайності. Потреби рослин у воді визначаються погодними умовами, біологічними характеристиками виду рослини, стадією її росту та розвитку, а також фізичними та біологічними властивостями ґрунтів. Дефіцит вологи у верхньому шарі ґрунту під час сівби може перешкоджати проростанню насіння, що призводить до зменшення кількості сходів та зниження врожайності.Початок сільськогосподарської посухи з часом може значно відрізнятися від початку метеорологічної посухи залежно від наявних запасів вологи. Виникненню посух сприяє вплив додаткових факторів, що перешкоджають накопиченню запасів вологи в ґрунті: взимку це брак снігу, ранньою весною – несприятливі умови для поглинання талої води, влітку – інтенсивне випаровування під впливом сильних і гарячих вітрів, відомих як Суховей. Посуха посилюється, коли висока атмосферна температура одночасно переважає з низькими умовами вологості ґрунту. Загалом, ґрунтова посуха викликається двома основними факторами: дуже низькою вологістю ґрунту та дуже низькою вологістю повітря, що зумовлено специфічними умовами атмосферної циркуляції, такими як стаціонарні або блокуючі антициклони (Semenova and Slizhe, 2020). Поєднання ґрунтової та атмосферної посухи призводить до так званої загальної посухи, коли вологість ґрунту надзвичайно низька, а дефіцит вологи в повітрі надзвичайно високий. Грунтова посуха впливає на атмосферу, викликаючи різке зниження вологості повітря(Cherenkova et al., 2015). Тому в Нікопольському районі з кожним роком випадає все менше опадів, зменшується і вологість ґрунту. Це призводить до високої ймовірності одночасного виникнення посухи в атмосфері та ґрунті.

3.МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

3.1.Оцінка стану природного середовища в районі видобутку марганцевої руди.

Відновлення величезних площ видобутку корисних копалин, які були залишені спустошеними, є критично важливим в Україні для покращення стану навколишнього середовища, здоров'я людини та сільськогосподарського виробництва. Надмірна кількість пилу з цих земель викликає проблеми з диханням у мешканців прилеглих до видобутку марганцевої та залізної руди у Нікопольському та Криворізькому районах (Duka et al., 2011; Karytonov et al., 2005). Такі землі також знижують рівень ґрунтових вод, зменшуючи врожайність сільськогосподарських культур на досить великій відстані від шахти. Ці землі повертають в напрямку біологічної рекультивації. Потреба в рекультивації є особливо актуальною в Нікопольському районі Дніпропетровської області через масштабний видобуток марганцю, який почався більше ніж вісімдесят років тому. У Нікопольському районі регіоні є 9000 га видобутку корисних копалин з заміненим ґрунтом, але більшість з них зазнала неефективної рекультивації. Ще 10 000 га або більше існує без заміни ґрунту (переважно від гірничих робіт понад 30 років тому), і, за оцінками, ще 150 000 га або більше в Нікопольському районі зазнають значного негативного впливу від невідновлених видобувних земель. Гірничовидобувні роботи з видобутку марганцевої руди проводяться в місті Покров (бувше Орджонікідзе) на восьми кар’єрах. Навчально – дослідна станція рекультивації земель ДДАЕУ знаходиться більше 50 років на поверхні відвалу, сформованого після робіт з гірничо – технічної рекультивації на Запорізькому кар’єрі зазначеному на рисунку 3.1 літерою А.Найстарішим з кар’єрів є Олександрівський кар’єр, зазначений літерою G. Він відомий тим, що на початку 70-х років двадцятого сторіччя на відпрацбваній територіх площею 230 га була закладена зона відпочинку для жителів міста Покров. Для цього посередині виделеної зони був сформований з відпрацьованих гірських порід великий пагорб,який був відділений обводним каналом від другої частини новоутвореного ландшафтного парку і далі під керівництвом відомого українського дендролога професора Леоніда Рубцова був засаджений придатними до лісової рекультивації

деревами.



Рис. 3.1. Умовне позначення восьми кар'єрів

3.2.Польові експерименти на території навчально дослідної станції рекультивації порушених земель

Роботи з біологічної рекультивації на Запорізькому карьєрі почалися на початку 70-х років з освоєння відновленого гірничо-технічною рекультивацією відвала. Тут на території 8 га був створений плодовий сад. Решта території, до 55га була розпланована таким чином, щоб перевірити ефекти багаторічної фітомеліорації різних за геологічним віком гірських порід біогенного походження (рис.3.2).



Роботи на карьєрі



Гірничотехнічна рекультивація



Приклад покинутого карьєру



Фітомеліорація гірських порід

Рис. 3.2. Етапи робіт в кар'єрі і на відвалі з 1975 по 2015 роки

Наукові дослідження ефективності вирощування біоенергетичних травянистих (міскантус і світчграс) і деревних (тополя, верба і павловнія) почалися з 2015 року.

Польові експерименти з деревною культурою Павловнія були закладені на навчально-дослідній станції ДДАЕУ у місті Покров Нікопольського району Дніпропетровської області у 2017 році. В цей рік вирощені в Іспанії за технологією *in vitro* сіянці Paulovnia клон 112 були дорощені у новоствореній шкілці і висаджені на місці, де штучний грунтовий профіль був у свій час відсипаний на лесоподібному суглинку з півметровим прошарком піску і перекритий 40 см насипним шаром чорнозему(НШЧ) південного, тобто скорочено ЛС+50смП+40смНШЧ. Середня висота дерев через чотири роки сягала п'яти метрів (Рис.3.3).



Рис. 3.3.Павловнія клон 112 на штучному профілі ЛС+50смП+40смНШЧ

Станом на початок червня 2026 року висота дерев становить 7 метрів, а діаметр ствола 220мм.

Весною 2025 року була закладена нова плантація павловнії *Pawlovnia Tomentosa*. Коренева система була отримана після вирощування сіянців у лабораторії Інституту біоенергетичних культур та цукрового буряку НААН України. Рослини вирощували на фітомеліорованому лесоподібному суглинку. Для цього, з використанням мотобуру, були закладені напів'ями, куди спочатку був внесений перемішаний з насипною масою чорнозему осад стічних вод (Рис.3.4).



Рис.3.4. Використання мотобуру для створення напів'ям

Цей осад був отриманий з Південної станції аерації міста Дніпро після обробки флокулянтом на останній стадії виготовлення перед вивантаженням на ділянки зберігання. Дослідна схема складалась з чотирьох варіантів внесення осаду стічних вод: перший варіант не передбачав внесення осаду, тобто слугував контролем контроль (без будь якої обробки), Оброблений флокулянтом ОСВ був внесений у дозах 40 та 80 тон/га в другому та третьому варіантах. Четвертий варіант був запропонований, щоб уникнути підвищеної кількості важких металів у дозі 80 тон/га. Для цього в напів'яму вносили біовугілля у дозі 5 т/га (ОСВ+Ф80_Б). Біовугілля було отримано з дослідного підприємства в Одесі після проведення піролізу гілок акації в диапазоні 300-600ºС. Збір даних проводили на другий рік

після посадки рослин.

Методи вимірювання.

Біометричні показники включали вимірювання висоти вимірювальною лінійкою та товщини стовбура на висоті 1, 5 метри штангенциркулем (Рис.3.5.).



Рис. 3.5. Визначення висоти та діаметру стовбуру павловнії

Атомно – абсорбційна спектрофотометрія.

Мінеральні елементи, зокрема метали, відіграють важливу роль у біологічних системах, включаючи рослини. Магній (Mg) міститься в хлорофілах, кадмій (Cd) та алюміній (Al) є токсичними для метаболізму рослин. Метод, відомий як атомно-абсорбційна спектроскопія (ААС), допомагає кількісно визначити ці елементи та, таким чином, їхню важливість. Тому ААС є важливим методом для сільського господарства (аналіз ґрунту, рослин, води та добрив) та інших галузей, включаючи кормові ресурси, навколишнє середовище, забруднення, промислові стічні води, тощо. Цей аналітичний метод, заснований на атомній абсорбції, є високочутливим, оскільки лінії атомної абсорбції надзвичайно вузькі (0,02-0,5 Å), а енергії переходів унікальні для кожного елемента. Однак обмежена ширина лінії створює проблему при вимірюванні AAS, що зазвичай не буває в спектроскопії для розчину. Для дотримання закону Ламберта-Бера необхідно, щоб ширина смуги джерела була вузькою до ширини смуги піку поглинання. Навіть монохроматори хорошої якості з ефективною шириною смуги мають значно більшу смугу пропускання, ніж смуга пропускання піків поглинання. Тому, коли вимірювання атомної абсорбції проводяться звичайними монохроматорами, оснащеними джерелом безперервного

випромінювання, також отримують нелінійні калібрувальні криві. Проблема обмеженої ширини піку атомної абсорбції вирішується використанням лінійних джерел із шириною смуги, вужчою за піки поглинання. Тому необхідно використовувати збуджуючий промінь, який містить високу інтенсивність світла необхідних довжин хвиль. Це досягається використанням лампи з порожнистим катодом. Наприклад, пік поглинання при 213,9 нм слугує основою для визначення цинку, тоді виділяють та використовують пік випромінювання цинку на тій самій довжині хвилі. У цьому випадку лінія утворюється цинковою лампою, яка збуджує атоми цинку електричним розрядом. Інші лінії цинку, що випромінюються джерелом, видаляються за допомогою фільтрів або відносно економічно ефективного монохроматора. Уміст важких металів визначали на атомно – абсорбційному спектрофотометрі Сатурн 3.

Спектрорадіометрія

Спектрорадіометр «FieldSpec 3.1» був використаний для оцінки спектральних індексів листя в усіх чотирьох варіантах. Визначення спектральних характеристик листя було зроблене в центрі дистанційного зодування ДЗЗ (ЦАКІЗ, Київ). Зібрані спектральні спостереження були оброблені з урахуванням чотирьох діапазонів довжин хвиль (Tola et al., 2023): (i) (400-700 нм; 680-780 нм), (ii) (NIR: 700-1300 нм), (iii) (SWIR-1: 1300 до 1900 нм) та (iv) (SWIR-2: 1900 до 2300 нм).

Термогравіметрія Оцінка паливних параметрів листя павловнії було виконана на дериваторгафі угорської фірми «Паулік» на кафедрі хімії ДДАЕУ.

Властивості біомаси включають як фізичні, так і хімічні явища, а саме: плавлення,випаровування, сублімацію, термічний розклад, горіння, десорбцію, хемосорбцію, абсорбцію,адсорбцію, температуру переходу та окислювальну стабільність. Ефективна та результативна робота біоустановки залежить від синхронізації параметрів процесу з характеристиками сировини.

Вартісні та часові наслідки характеристики біомаси на основі остаточного аналізу можуть бути непрактичними для швидкого визначення властивостей сировини біомаси, що надходить на переробний завод. Оскільки ці властивості впливають на шлях перетворення, витрати на переробку, вихід та якість продукції, здатність швидко оцінювати їх для сировини біомаси, що надходить на переробний завод, буде корисною для успіху та ефективності технологій біоконверсії. Детальне

розуміння динаміки випаровування твердих речовин сприятиме кращому плануванню життєво важливих промислових процесів, оскільки піроліз є не лише незалежною технологією перетворення, але й частиною процесів газифікації та горіння. Термогравіметрія (ТГ) є важливою з огляду на вищезазначені вимоги.Як правило, основними елементами в біомасі є: вуглець С, кисень О, водень Н з лігніном, геміцелюлоза та целюлоза як її основний структурний компонент. ТГ – це розділ термічного аналізу біомаси, який займається вимірюванням зміни маси зразків. Ці вимірювання можуть проводитися як функція зміни температури або ізотермічно як функція часу в атмосфері повітря, азоту, кисню, аргону, гелію, інших газів. За міжнародним стандартом термогравіметрія визначається як метод, за допомогою якого вага речовини в умовах контрольованого нагрівання або охолодження реєструється як функція часу або температури. Термогравіметричний аналіз (ТГА) є часто використовуваним методом аналізу кінетичних даних. Також у термохімічному процесі, такому як піроліз, вичерпні знання про біомасу як сировину є важливими для проектування, доцільності, оцінки та масштабування промислових процесів. З розвитком технологій з'явилося кілька моделей термогравіметричних аналізаторів (TGA) з різними можливостями, а деякі інші можна використовувати разом з деяким вимірювальним обладнанням, таким як спектрометр, інфрачервоний аналізатор тощо. TGA можна використовувати як ефективний інструмент для проведення безпосереднього аналізу твердого біопалива. Основними компонентами TG-аналізатора є: тигель або піддон для зразків і піч, баланс,

блок вимірювання та контролю температури, блок контролю навколишнього середовища, система запису. Прецизійні баланси підтримують тигель. Тигель розміщується в печі за контрольованих умов нагрівання та температури. Це означає, що фізичні та хімічні властивості біомаси в цьому випадку безперервно записуються. Термічний аналіз включає кілька методів, які відрізняються за властивостями, які можна виміряти, хоча кілька з цих властивостей можна виміряти одночасно.

4.РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

4.1.Вивчення впливу осаду стічних вод за вирощування павловнії на техноземі

Додавання осаду стічних вод у двох дозах (40 та 80 т/га) призвело до поступового підвищення висоти рослин павловнії до 10%. У варіанті з додаванням біовугілля висота рослин збільшилася на 20% (рис. 4.1).

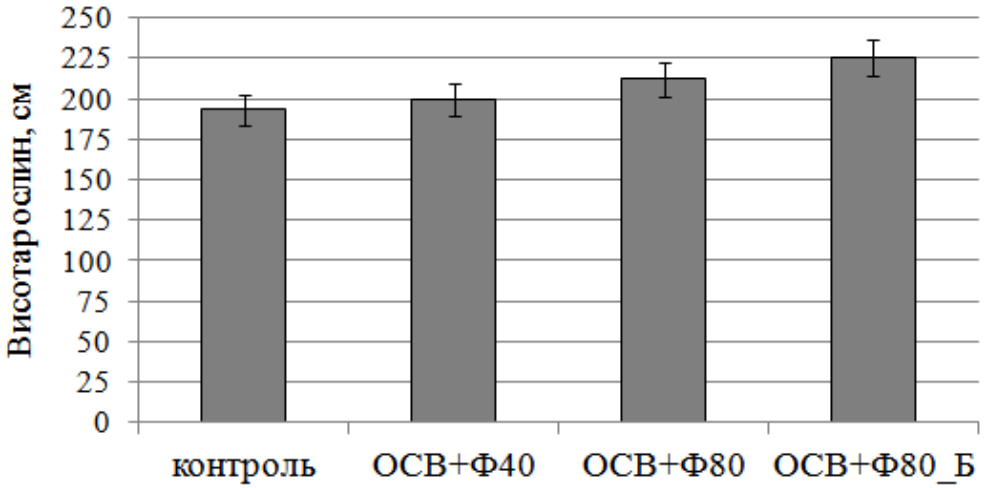


Рис. 4.1. Оцінка висоти павловнії за різних доз ОСВ

Динаміка збільшення діаметру стовбуру павловнії була менша, у порівнянні з темпами росту і склала у варіанті з додаванням 80 т/га ОСВ - 7%, а з внесенням біовугілля - 10% (рис. 4.2).

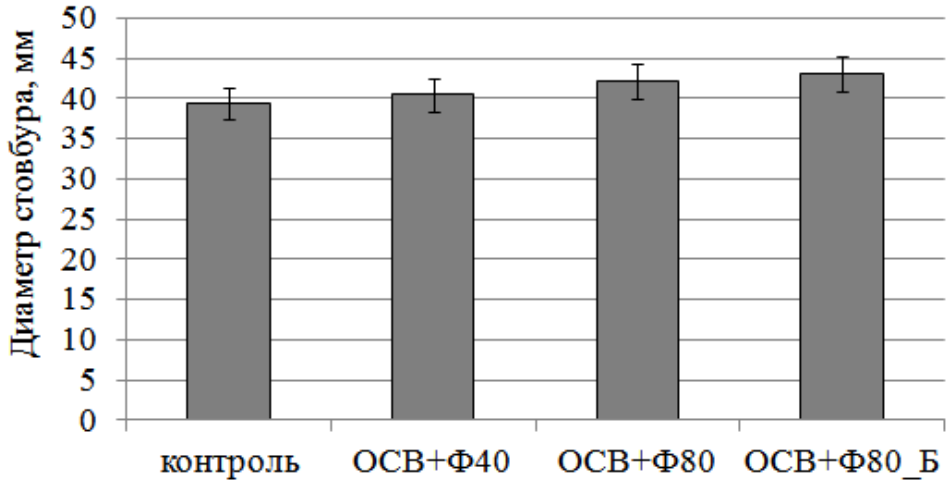


Рис. 4.2. Товщина стовбуру дворічних рослин павловнії за різних умов внесення ОСВ

4.2. Оцінка вмісту важких металів у листі павловнії

Результати визначення концентрації важких металів в листі павловнії наведені на рисунку 4.3.

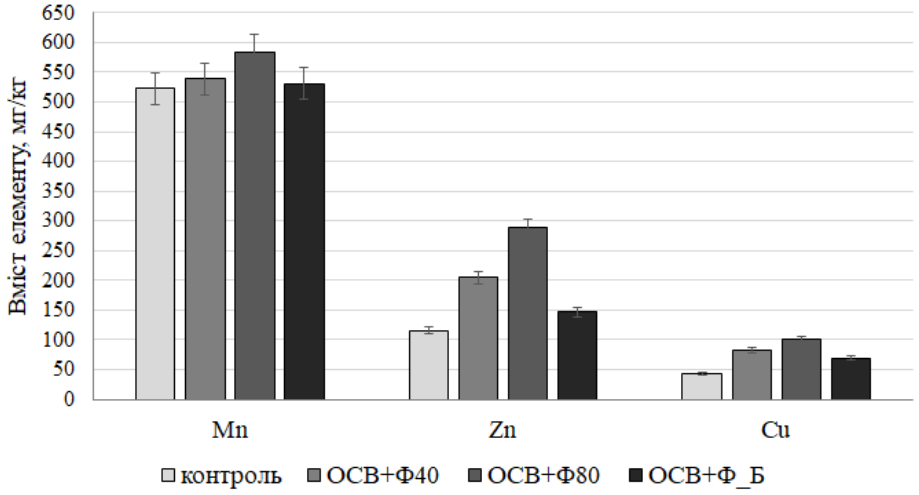


Рис. 4.3. Концентрація важких металів у листі павловнії відповідно дозі внесення ОСВ

Найбільший вміст марганцю,цинку та міді в листі зафіксований у варіанті з внесенням 80 т/га ОСВ. Разом з тим темпи зростання вмісту цих металів в листі були різними: 12% для марганцю, 2,3 рази для міді, та 2, 5 раза - для цинку. Внесення біовугілля спрацювало на зменшення вмісту важких металів у листі. Найбільш виразним цей ефект був для міді і цинку Внесення осаду стічних вод зазначилось для хрому, свинцю та нікелю за умов внесення ОСВ у дозі 80 т/га ОСВ (4.4).

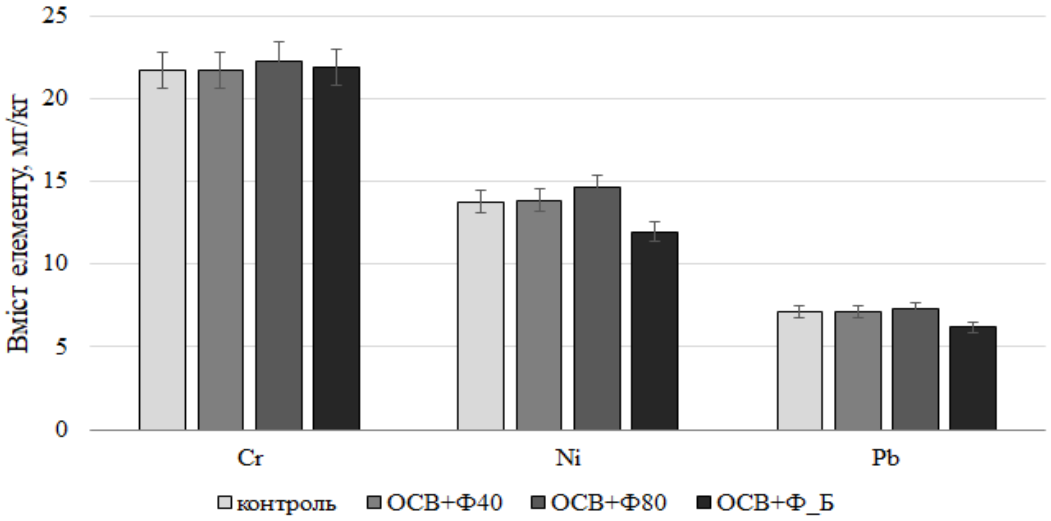


Рис. 4.4. Вміст важких металів у листках павловнії за різних умов внесення осаду стічних вод

4.3.Оцінка фізіологічного стану рослин павловнії

Чотири криві спектрального відбиття листя павловнії наведені на рис.4.5.

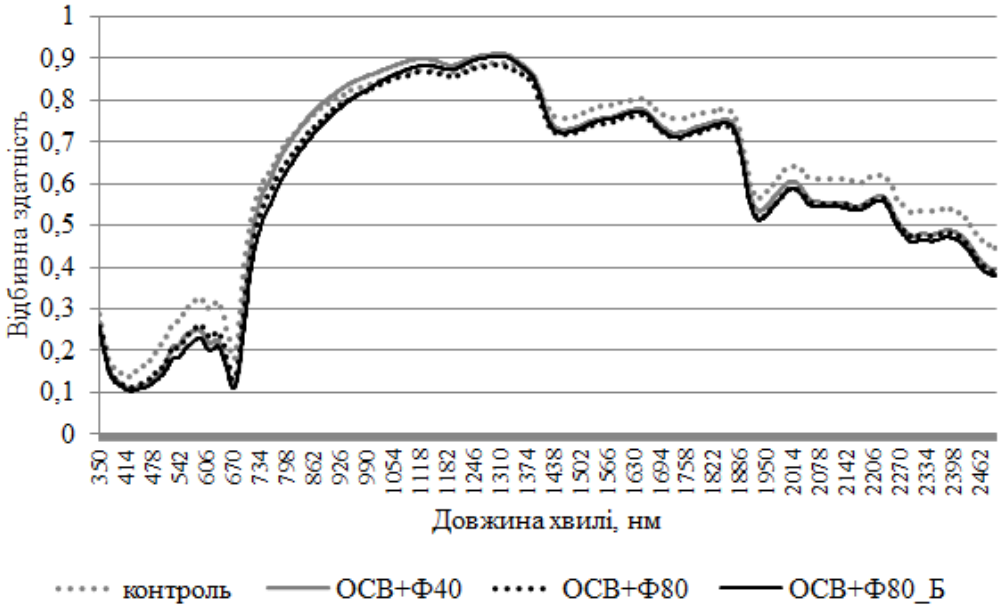


Рис. 4.5. Крива спектрального відбиття листя павловнії

Найнижче значення відбиття в інтервалі 540-650нм свідчить про найвищу адсорбцію хлорофілу у варіанта ОСВ+Ф80 та ОСВ+Ф_Б.

4.4. Термогравіметрична оцінка листя павловнії

Аналіз процесу термолізу листя павловнії виконаний на дериватографі дозволив виявити три діапазони проходження температур (табл. 4.1). Перший діапазон пов'язаний з переходом у газову форму легкоруйнинівних органічних речовин тобто від 30°С до 210°С.

Таблиця 4.1

Результати процесу термолізу листя павловнії

Варіанти	Стадія	Діапазон, °С	Пік, °С	Макс. рівень, %/хвил	Втрата маси, %	Остаточний залишок, %
Контроль	I	30-210	91	11,2	13,52	
	II	211-430	310-320	10,2	30,68	
	III	431-668	480	14,1	30,68	25,12
40т ОСВ /га	I	30-180	102-111	11,1	12,69	
	II	181-420	301-310	11,2	33,59	
	III	421-600	481	16,2	30,47	23,25
80 т ОСВ /га	I	40-200	110	8,2	9,67	
	II	201-420	300	8,1	32,66	30,01

	III	421-630	490	9,2	27,66	
80 т ОСВ /га +біочар	I	50-130	101	6,9	5,2	
	II	132-400	290	7,2	29,22	
			320	6,9		
	I	401-600	480	9,1	28,4	37,18

Термічні ефекти розкладання геміцелюлози, целюлози та лігніну можна побачити на прикладі кривої DTA (рис. 4.6)

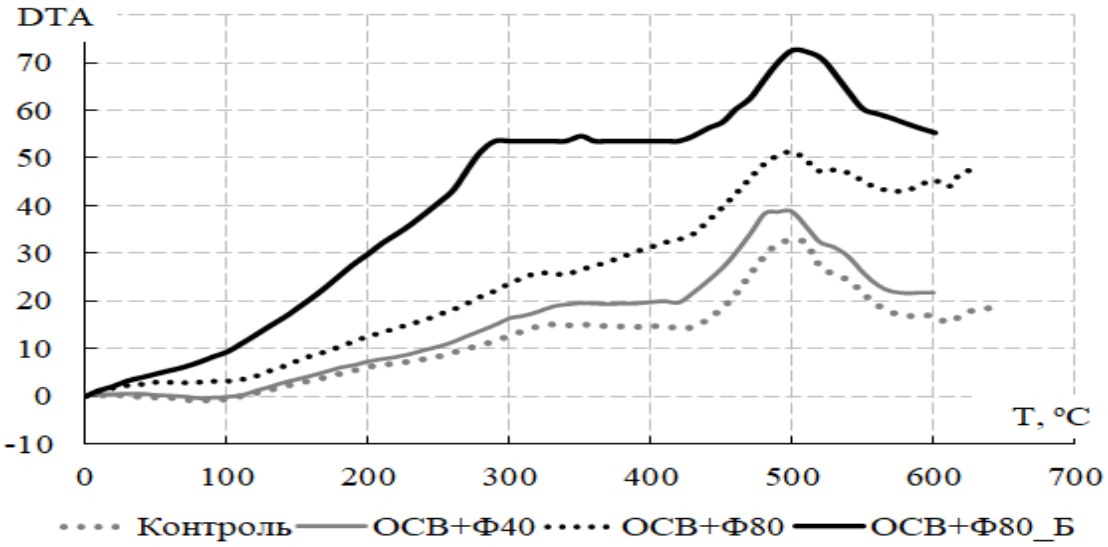


Рис. 4.6. Термічні ефекти розкладання листя павловнії за різних умов додавання осаду стічних вод

Порівняння початкових і кінцевих моментів газифікації біомаси листя свідчить про різний рівень зольного залишку відповідно варіантам досліду з внесенням осаду стічних вод. Найбільший відсоток залишку золи 37,2% відмічений у варіанті ОСВ+Ф_Б.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Аналіз умов праці під час вирощування павловнії на техноземах

Проведення досліджень щодо ефективності використання осаду стічних вод при вирощуванні павловнії на техноземах пов'язане з виконанням комплексу польових та лабораторних робіт, що потребують дотримання вимог охорони праці та виробничої безпеки. Особливістю досліджуваного об'єкта є проведення робіт на техногенно порушених землях, які характеризуються неоднорідними фізико-механічними властивостями ґрунту, наявністю ущільнених ділянок, локальних понижень рельєфу та обмеженим рослинним покривом.

Основні роботи включають підготовку дослідних ділянок, внесення осаду стічних вод, висаджування садивного матеріалу павловнії, проведення фенологічних спостережень, відбір зразків ґрунту та визначення біометричних показників рослин. Під час виконання зазначених операцій працівники можуть зазнавати впливу комплексу виробничих факторів різної природи.

До фізичних факторів належать підвищена температура повітря в літній період, інтенсивне сонячне випромінювання, пилове навантаження, шум від роботи сільськогосподарської техніки та ризик механічного травмування під час використання ручного інструменту. Особливої уваги потребує пересування територією техноземів, де можливі нерівності поверхні, локальні просідання та ослаблені ділянки субстрату.

Під час використання осаду стічних вод необхідно враховувати можливий вплив біологічних та хімічних факторів. Незважаючи на попередню підготовку та контроль якості осаду, персонал повинен уникати безпосереднього контакту матеріалу зі шкірою та слизовими оболонками, використовувати рукавички, захисний одяг і дотримуватися правил особистої гігієни після завершення робіт.

Важливою складовою системи охорони праці є проведення первинного та повторного інструктажів, забезпечення працівників засобами індивідуального захисту, а також постійний контроль дотримання вимог безпеки під час виконання польових операцій. Застосування профілактичних заходів сприяє зниженню ризику виробничого травматизму та забезпечує безпечні умови виконання досліджень.

5.2 Потенційно небезпечні та шкідливі фактори під час вирощування павловнії на техноземах із застосуванням осаду стічних вод

Вирощування павловнії (Paulownia) на техноземах із використанням осаду стічних вод супроводжується виконанням комплексу польових, агротехнічних та дослідницьких робіт, під час яких працівники можуть зазнавати впливу небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища. Їх наявність зумовлена як особливостями досліджуваного об'єкта, так і специфікою технології вирощування рослин на техногенно порушених землях.

Техноземи являють собою штучно сформовані ґрунтові конструкції, створені на територіях, порушених гірничодобувною діяльністю. Для таких земель характерними є неоднорідність фізичних властивостей субстрату, нерівність поверхні, підвищена щільність окремих горизонтів та недостатня сформованість рослинного покриву. У зв'язку з цим під час пересування територією дослідних ділянок існує ризик падіння, травмування нижніх кінцівок та виникнення інших механічних пошкоджень.

Серед фізичних факторів найбільше значення мають метеорологічні умови. Більшість досліджень проводиться на відкритому повітрі, де працівники перебувають під впливом сонячної радіації, високих температур, атмосферних опадів та сильного вітру. У літній період температура поверхні техноземів може значно перевищувати температуру навколишнього повітря через темне забарвлення субстрату та відсутність суцільного рослинного покриву. Такі умови сприяють швидкому перегріванню організму, підвищують навантаження на серцево-судинну систему та можуть призводити до теплового виснаження.

Додатковим несприятливим фактором є пилове навантаження. На порушених землях процеси дефляції часто проявляються інтенсивніше, ніж на природних ґрунтах. За сухої та вітряної погоди дрібнодисперсні частинки можуть потрапляти до органів дихання, подразнювати слизові оболонки очей та погіршувати самопочуття працівників. Особливо актуальною ця проблема є під час проведення механізованих робіт, підготовки ділянок до висаджування саджанців та відбору ґрунтових зразків.

Під час застосування осаду стічних вод виникає необхідність врахування можливого впливу хімічних факторів. Залежно від походження та технології обробки осад може містити різні концентрації органічних сполук, макро- та мікроелементів. Незважаючи на проведення контролю якості матеріалу перед використанням, контакт із ним потребує дотримання відповідних заходів безпеки. Потрапляння частинок осаду на шкіру, слизові оболонки або до органів дихання може спричиняти подразнення та алергічні реакції в осіб із підвищеною чутливістю.

До біологічних факторів належить можливий вплив мікроорганізмів, які природно присутні в органічних матеріалах та ґрунтовому середовищі. Ризик їхнього негативного впливу суттєво знижується завдяки попередній обробці осаду та дотриманню санітарно-гігієнічних вимог, однак використання рукавичок, спецодягу та своєчасне миття рук після завершення робіт залишаються обов'язковими заходами профілактики.

Під час виконання агротехнічних операцій можливий вплив механічних небезпек. Використання лопат, сапок, бурів для садіння, вимірювального обладнання та іншого інвентарю потребує уважності та дотримання правил безпечної експлуатації. Додаткові ризики виникають під час застосування сільськогосподарської техніки, особливо в умовах обмеженого простору або нерівного рельєфу.

Окрему групу становлять психофізіологічні фактори. Польові дослідження часто передбачають тривале перебування на відкритій місцевості, значні фізичні навантаження, виконання однотипних операцій та необхідність постійного контролю експериментальних ділянок. Це може спричиняти втому, зниження концентрації уваги та підвищення ймовірності помилкових дій. У сучасних умовах додатковим джерелом психологічного напруження є воєнний стан та необхідність реагування на сигнали повітряної тривоги.

Для території м. Покров та прилеглих районів важливим фактором ризику є безпекова ситуація, пов'язана зі збройною агресією російської федерації проти України. Під час виконання польових досліджень необхідно враховувати можливість оголошення повітряної тривоги, ракетної небезпеки або інших надзвичайних ситуацій воєнного характеру. Це вимагає наявності чіткого

алгоритму дій, постійного зв'язку між учасниками робіт та знання місць розташування найближчих укриттів.

Таким чином, під час вирощування павловнії на техноземах із застосуванням осаду стічних вод на працівників може впливати комплекс фізичних, хімічних, біологічних, механічних та психофізіологічних факторів. Ефективне управління професійними ризиками потребує впровадження організаційних, технічних і санітарно-гігієнічних заходів, спрямованих на забезпечення безпечних умов праці та збереження здоров'я персоналу.

5.3 Вимоги безпеки під час проведення польових робіт та внесення осаду стічних вод

Проведення досліджень щодо ефективності використання осаду стічних вод при вирощуванні павловнії на техноземах передбачає виконання комплексу польових, агротехнічних та аналітичних робіт, які повинні здійснюватися з дотриманням вимог охорони праці та виробничої безпеки. Особливість таких досліджень полягає в необхідності одночасної роботи з органічними матеріалами, ґрунтовими субстратами та польовим обладнанням на територіях із трансформованим рельєфом.

До виконання робіт допускаються особи, які пройшли вступний та первинний інструктажі з охорони праці, ознайомлені з особливостями проведення досліджень і володіють навичками безпечного використання інструментів та обладнання. Перед початком польового сезону всі учасники робіт повинні бути поінформовані про можливі ризики, пов'язані з виконанням дослідних робіт на техногенно порушених землях, а також про порядок дій у разі виникнення аварійних або надзвичайних ситуацій.

Перед початком роботи необхідно провести огляд дослідної ділянки та переконатися у відсутності небезпечних факторів, які можуть становити загрозу для здоров'я працівників. Особливу увагу слід приділяти ділянкам із нерівною поверхнею, локальними просіданнями, залишками будівельних конструкцій, уламками гірських порід або іншими сторонніми предметами. Переміщення територією техноземів повинно здійснюватися обережно з урахуванням

особливостей рельєфу та стану поверхні ґрунту.

Важливим етапом досліджень є транспортування та внесення осаду стічних вод. Роботи повинні виконуватися з використанням справного обладнання та відповідно до встановлених технологічних вимог. Осад допускається до використання лише за наявності результатів лабораторного контролю, які підтверджують його відповідність екологічним та санітарно-гігієнічним нормативам. Під час контакту з осадом працівники повинні використовувати спеціальний одяг, захисні рукавички та закрите взуття. За необхідності рекомендується застосовувати захисні окуляри та респіратори для попередження потрапляння дрібнодисперсних частинок до органів дихання.

Під час внесення осаду стічних вод забороняється приймати їжу, палити або торкатися обличчя забрудненими руками. Після завершення робіт необхідно ретельно вимити руки з використанням мийних засобів та за потреби провести санітарну обробку відкритих ділянок шкіри. Робочий одяг повинен зберігатися окремо від особистих речей і регулярно очищуватися від забруднень.

Особливу увагу необхідно приділяти безпеці під час висаджування саджанців павловнії та подальшого догляду за насадженнями. Перед початком робіт необхідно перевірити справність ручного інструменту та переконатися у відсутності пошкоджень його робочих частин. Використання несправного обладнання може стати причиною травмування працівників або погіршення якості виконання робіт. Під час роботи необхідно дотримуватися безпечної відстані між працівниками для запобігання випадковому травмуванню інструментами.

Під час відбору ґрунтових зразків, проведення вимірювань та біометричних спостережень необхідно використовувати справне вимірювальне обладнання та дотримуватися встановлених методик досліджень. Особливу обережність слід проявляти під час роботи на схилах, насипах або ділянках зі слабкою стійкістю поверхневого шару технозему. Роботи на потенційно небезпечних ділянках рекомендується виконувати не менше ніж двома особами.

У разі застосування механізованих засобів для підготовки ґрунту або транспортування матеріалів необхідно дотримуватися вимог безпечної експлуатації сільськогосподарської техніки. Перед початком роботи перевіряють технічний стан обладнання, справність гальмівної системи, освітлювальних

приладів та захисних пристроїв. Під час роботи механізмів перебування сторонніх осіб у робочій зоні забороняється. Будь-які регулювальні або ремонтні операції виконують лише після повної зупинки двигуна та відключення обладнання від джерел енергії.

Враховуючи проведення робіт на відкритій місцевості, необхідно постійно контролювати погодні умови. За високої температури повітря рекомендується збільшувати тривалість перерв для відпочинку та забезпечувати працівників достатньою кількістю питної води. У разі виникнення грози, сильного вітру або інших небезпечних погодних явищ усі роботи повинні бути тимчасово припинені до нормалізації умов праці.

У сучасних умовах важливою складовою безпеки є дотримання вимог, пов'язаних із воєнним станом. Перед початком робіт усі учасники досліджень повинні знати місця розташування найближчих укриттів та маршрути евакуації. У разі оголошення повітряної тривоги роботи негайно припиняються, а персонал організовано переміщується до захисної споруди. Повернення до виконання польових досліджень дозволяється лише після офіційного повідомлення про відбій тривоги.

Після завершення робочого дня необхідно очистити та впорядкувати робоче місце, провести огляд інструментів і обладнання, перевірити відсутність джерел пожежної небезпеки та забезпечити належне зберігання матеріалів. Дотримання зазначених вимог дозволяє мінімізувати виробничі ризики, запобігти виникненню нещасних випадків і забезпечити безпечне виконання досліджень з вирощування павловнії на техноземах із застосуванням осаду стічних вод.

5.4 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Під час проведення досліджень з вирощування павловнії (Paulownia) на техноземах із використанням осаду стічних вод особливу увагу необхідно приділяти питанням безпеки в надзвичайних ситуаціях. Роботи виконуються переважно на відкритих територіях, тому працівники можуть піддаватися впливу несприятливих природних явищ, техногенних аварій та небезпек, пов'язаних із воєнним станом.

До найбільш імовірних природних надзвичайних ситуацій належать сильні зливи, шквальний вітер, грози, пилові бурі та аномально високі температури повітря. За умов тривалого перебування на відкритій місцевості можливе перегрівання організму, тепловий або сонячний удар. Для попередження негативних наслідків роботи рекомендується проводити у ранкові години, забезпечувати працівників достатньою кількістю питної води, головними уборами та засобами захисту від ультрафіолетового випромінювання.

Особливу небезпеку під час польових робіт становлять грозові явища. У разі наближення грозового фронту необхідно негайно припинити роботи та залишити відкриті ділянки місцевості. Забороняється перебувати поблизу поодиноких дерев, металевих конструкцій, ліній електропередач та сільськогосподарської техніки. Найбільш безпечним місцем під час грози є капітальна будівля або спеціально обладнане укриття.

До техногенних ризиків належать можливі аварії транспортних засобів, пожежі, вихід з ладу механізмів, а також випадкове пошкодження ємностей для зберігання осаду стічних вод. У разі виникнення пожежі необхідно негайно повідомити відповідні служби, організувати евакуацію людей із небезпечної зони та вжити заходів щодо локалізації осередку займання первинними засобами пожежогасіння за умови відсутності загрози для життя працівників.

Окремої уваги потребує забезпечення безпеки в умовах воєнного стану. Територія Дніпропетровської області періодично зазнає ракетних ударів та атак безпілотних літальних апаратів, що створює додаткові ризики для працівників, які виконують польові дослідження. Перед початком робіт необхідно визначити найближчі укриття, перевірити наявність засобів зв'язку та ознайомити персонал із маршрутами евакуації.

У разі оголошення сигналу «Повітряна тривога» всі роботи повинні бути негайно припинені. Працівники зобов'язані залишити робочі місця та організовано переміститися до найближчого захисного укриття. Повернення до виконання робіт дозволяється лише після офіційного повідомлення про відбій повітряної тривоги. Забороняється ігнорувати сигнали оповіщення незалежно від стадії виконання робіт.

Під час роботи на територіях, що раніше зазнавали впливу бойових дій або

можуть містити потенційно небезпечні предмети, необхідно дотримуватися підвищених заходів безпеки. У разі виявлення невідомих металевих предметів, боєприпасів або їх фрагментів забороняється торкатися їх, переміщувати чи намагатися самостійно знешкодити. Про знахідку необхідно повідомити відповідні служби та обмежити доступ сторонніх осіб до небезпечної ділянки.

У випадку травмування працівника першочерговими заходами є усунення дії небезпечного фактора, надання домедичної допомоги та виклик екстрених служб. На місці проведення робіт повинна бути аптечка, укомплектована відповідно до чинних вимог, а працівники мають володіти базовими навичками надання першої допомоги.

Таким чином, дотримання вимог безпеки в надзвичайних ситуаціях дозволяє мінімізувати ризики для здоров'я працівників та забезпечити безпечне проведення досліджень під час вирощування павловнії на техноземах.

5.5 Заходи щодо покращення умов праці та підвищення рівня безпеки

Аналіз умов праці під час проведення досліджень із вирощування павловнії на техноземах із застосуванням осаду стічних вод свідчить про необхідність постійного вдосконалення системи охорони праці. Основною метою таких заходів є зниження професійних ризиків, збереження здоров'я працівників та створення безпечного виробничого середовища.

Одним із пріоритетних напрямів є забезпечення працівників сучасними засобами індивідуального захисту. Під час роботи з осадом стічних вод доцільно використовувати захисний одяг, гумові рукавички, захисні окуляри та респіратори. Регулярне оновлення засобів захисту сприятиме підвищенню рівня безпеки та зменшенню ймовірності контакту працівників із потенційно небезпечними речовинами.

Для зниження негативного впливу несприятливих погодних умов рекомендується раціонально планувати режим праці та відпочинку. У літній період польові роботи доцільно виконувати в ранкові або вечірні години, коли температура повітря є нижчою. На дослідних ділянках необхідно передбачити місця короткочасного відпочинку, забезпечити запас питної води та засоби першої

допомоги.

Важливим заходом є проведення регулярного навчання працівників з питань охорони праці, пожежної безпеки та дій у надзвичайних ситуаціях. Особливу увагу слід приділяти алгоритмам поведінки під час повітряної тривоги, евакуації та наданню домедичної допомоги постраждалим.

Для підвищення рівня безпеки під час використання сільськогосподарської техніки необхідно забезпечити її своєчасне технічне обслуговування та контроль справності. Експлуатація машин і механізмів повинна здійснюватися лише підготовленими працівниками, які пройшли відповідне навчання та інструктаж.

Перспективним напрямом удосконалення системи охорони праці є впровадження сучасних цифрових засобів моніторингу та оповіщення. Використання мобільних застосунків для отримання повідомлень про надзвичайні ситуації, погодні умови та сигнали повітряної тривоги дозволить оперативно реагувати на потенційні загрози.

Важливе значення має також проведення періодичного медичного контролю працівників, які контактують з органічними добривами та працюють в умовах підвищеного пилового навантаження. Своєчасне виявлення можливих порушень стану здоров'я сприятиме запобіганню розвитку професійних захворювань.

Отже, реалізація запропонованих заходів забезпечить підвищення рівня безпеки праці, зменшення виробничих ризиків та створення сприятливих умов для проведення досліджень щодо вирощування павловнії на техноземах із використанням осаду стічних вод.

ВИСНОВКИ

1. На основі наведеного огляду літератури можна зробити висновок, що основною метою вирощування павловнії в коротких циклах є виробництво деревної біомаси для енергетичної та целюлозно-паперової промисловості, а також для інших галузей, пов'язаних з обробкою деревини, створенням деревних композитів та біополімерів, газифікацією деревини тощо.

2.Експерименти в Поліссі, Лісостепу та Степу України перебувають на різних стадіях через різний початок досліджень в цих природних зонах пов’язаних з більшою придатністю до кліматичних умов, найважливішим з яких є коротший вегетаційний період, що значно знижує ріст розсади та виробництво біомаси. Друга причина – низькі температури та заморозки навесні та восени. Це не виключає можливості інтродукції павловнії в Україні, але потрібні подальші дослідження, головним чином для вдосконалення методів вирощування, щоб найкраще адаптувати дерево до конкретних кліматичних умов. Використання відповідного захисту від заморозків та різних агротехнічних обробок може допомогти в цьому.

3. Павловнія та її гібриди пропонують серйозну альтернативу деяким місцевим видам дерев в Україні, але вона не є універсальним видом і потребує подальших досліджень, відбору сортів та вдосконалених методів вирощування для впровадження у виробництво в певних регіонах нашої країни.

4. Внесення осаду стічних вод спричинює позитивний вплив на висоту та товщину стебла павловнії. Внесення осаду стічних вод не призводить до суттєвого підвищення вмісту важких металів у листках, а додавання біовугілля взагалі зменшує поглинальну здатність рослин до важких металів.

5. Найвищий рівень синтезу хлорофілу відмічений у рослин павловнії, які виросли у варіантах ОСВ+Ф80 та ОСВ+Ф_Б.

6.Порівняння даних росту павловнії, висадженої на насипному шарі чорнозему і на лесоподібному суглинку свідчить, що незважаючи на на внесення осаду стічних вод у досить значимих дозах 40 та 80 т/га забезпечення схожих показників неможливо. Вочевидь, що фізичні властивості лесоподібного суглінку обмежують ріст рослин павловнії. Цей висновок збігається з результатами

попереднього польового досліду з вирощування павловнії на тришаровому профілі, де на поверхню лесоподібного суглинку був нанесений шар піску, а потім перекритий 40см шаром чорнозему південного. Отже перспектива вирощування павловнії на техноземах пов’язана з пошуком штучного профілю, який не буде обмежувати темпи її росту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.Бондар В.С., Фурса А.В. Економічне обґрунтування технологій вирощування і переробки рослинної сировини на тверді види біопалива // Економіка АПК. №3. – 2015 – С.22-27.

2.Гументик, М. Я. (2021). Застосування біоенергетичних культур для виробництва біопластику. *Біоенергетика*, (2), 13–15. https://doi.org/10.47414/be.2.2021.244101

3.Гументик, М. Я. (2021). Технологічні основи створення промислових плантацій високопродуктивних біоенергетичних культур. *Біоенергетика*, (1), 14–17. https://doi.org/10.47414/be.1.2020.224938

4.Висоцька Н.Ю. та ін. 2019. Оцінка сучасного стану захисних лісових смуг різного цільового призначення та об’єктів лісової рекультивації. Харків. 21 с.

5.Пилипенко О.І., Юхновський В.Ю., Дударець С.М., Малюга В.М. Лісові меліорації: підруч. / за ред.В.Ю. Юхновського. Київ: Аграрна освіта, 2010. 282 с.

6.Роїк , М. В., Сінченко, В. М., Нурмухаммедов, А. К., Ганженко, О. М. ., & Соломаха, І.В. , Саблук, В.Т., Гументик, М.Я., Соломаха В.А. Особливості створення швидкорослих та поліфункціональних насаджень у лісостеповій зоні України Агроекологічний журнал №4, С.6-15. DOI: https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2022.273244

7.Соломаха І.В., Шевчик В.Л. 2020. Синтаксономія полезахисних лісових смуг Середнього Придніпров’я.Чорноморський ботанічний журнал.. № 16 (1).С. 40–54. DOI: https://doi.org/10.32999/ksu1990-553X/2020-16-1-2.

8.Стадник А.П. Оптимізація структури захиснихлісових насаджень та їх систем в агроландшафтах України. 2018. Наукові праці Лісівничої академії наук України. Вип. 16. С. 70–80. DOI: https://doi.org/10.15421/411808.

9.Фурдичко О.І. Агроекологія: моногр. Київ: Аграрна наука, 2014. 400 с.

10.Фурдичко О.І., Тимочко І.Я. . 2020. Методологічні основи концепції створення стабільного екологічно стійкого простору агроландшафтах. Збалансоване природокористування. № 2. С. 60–66.DOI: https://doi.org/10.33730/2310-4678.2.2020.208809.

11.Чорнобров, О.Ю., Соломаха, В.А., Соломаха, І.В., Саблук, В.Т.,

Гументик, М.Я., Шевчик. В.Л. (2024). Відтворення полезахисних лісосмуг, пошкоджених унаслідок військових дій, у зоні лісостепу УкраїниАгроекологічний журнал. №4С.81-91. DOI: https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2024.317154

12.Ягольник О.О., Гументик М.Я. 2020. Павловнія високопродуктивна культура для виробництва біопалива та деревини. Біоенергетика. 2 (16), 6-8

13.Ates, S., Ni, Y., Akgül, M. and Tozluoğlu, A. (2008) Characterization and evaluation of Paulownia elongota as a raw material for paper production. African Journal of Biotechnology, 7(22), 4153–4158. https://doi.org/10.5897/AJB2008.000-5073

14.Cherenkova, E.A., Semenova, I.G., Kononova, N.K., Titkova, T.B. 2015. Droughts and dynamics of synoptic processes in the south of the East European Plain at the beginning of the twenty-first century. Arid Ecosyst. 5, 45–56. doi:10.1134/S2079096115020055.

15.Chongpinitchai, A.R., Williams, R.A. 2021. The Response of the Invasive Princess Tree (*Paulownia tomentosa*) to Wildland Fire and Other Disturbances in an Appalachian Hardwood Forest. *Glob. Ecol. Conserv. 29*, e01734

16.Drzewiecka, K., Gasecka, M., Magdziak, Z., Budzy´ nska, S.,Szostek, M., Niedzielski, P., Budka, A., Roszyk, E., Doczekalska, B., Górska, M.; et al. 2021.The Possibility of Using Paulownia elongata S. Y. Hu Paulownia fortunei Hybrid for Phytoextraction of Toxic Elements from Post-Industrial Wastes with Biochar. Plants 2021, 10, 2049. https://doi.org/10.3390/plants10102049

17.Dubova, O., Voitovych, O., Boika, O. 2019,Paulownia Tomentosa–New Species for the Industrial Landscaping. *Curr. Trends Nat. Sci. 8*, 19–24.

18.Duka, Y. D., Ilchenko, S. I., Kharytonov, M. M., & Vasylyeva, T. L. (2011). Impact of open manganese mines on the health of children dwelling in the surrounding area. Emerging Health Threats Journal, 4(1). https://doi.org/10.3402/ehtj.v4i0.7110

19.Huseinovic, S., Osmanovic´, Z., Bektic´, S., Ahmetbegovic´, S. 2017. *Paulownia elongata* Sy Hu in Function of Improving the Quality of the Environment. *Period. Eng. Nat. Sci.*, *5*, 117–123. Available online: http://pen.ius.edu.ba/index.php/pen/article/view/83

20.Kaletnik, G., Pryshliak, N., Tokarchuk, D. 2021. Potential of Production of Energy Crops in Ukraine and Their Processing on Solid Biofuels. Ecol. Eng. Environ. Technol. 22, 59–70.

21.Kaygin, B., Kaplan, D., Aydemir, D. 2015. Paulownia Tree as an Alternative Raw Material for Pencil Manufacturing. BioResources 10, 3426–3433.

22.Kharytonov M., Zberovsky A., Drizhenko A., Babiy A. 2005. Air pollution assessment inside and around mining iron ore quarries / Advances in air pollution modeling for environmental security, Springer. Printed in the Netherlands. - P. 263-274.

23.Lisowski, J., Porwisiak, H. 2020. Oxytree tree biometric features (paulownia clon in vitro 112) after third and fourth years of cultivation.Zesz. Nauk. WSA W Łomz˙y Res. Books WSA Łomz˙a 41, 41–48.

24.Magar, L.B., Khadka, S., Joshi, J.R.R., et al. 2018. Total Biomass Carbon Sequestration Ability under the Changing Climatic Condition by Paulownia tomentosa Steud. Int. J. Appl. Sci. Biotechnol., 6, 220–226.

25.Morozova, I., Oechsner, H., Roik, M., Hülsemann, B., Lemmer, A. 2020. Assessment of Areal Methane Yields from Energy Crops in Ukraine, Best Practices. Appl. Sci. 10, 4431.

26.Navroodi, I.H. 2013. Comparison of Growth and Wood Production of *Populus deltoides* and *Paulownia fortunei* in Guilan Province (Iran). *Ind. J. Sci. Technol. 6*, 84–88

27.Semenova, I., Slizhe, M. 2020.Synoptic conditions of droughts and dry winds in the Black sea Steppe province under recent decades. Front. Earth Sci., 8, 69. doi:10.3389/feart.2020.00069.

28.Snow, W.A. 2015. Ornamental, Crop, or Invasive? The History of the Empress Tree (*Paulownia*) in the USA. *For. Trees Livelihoods*, *24*, 85–96

29.Tola, E., Al-Gaadi, K.A., Madugundu, R., Patil, V.C. and Sygrimis, N., 2023. Impact of water salinity levels on the spectral behavior and yield of tomatoes in hydroponics. *Journal of King Saud University - Science* **35**(2), 102515. doi: 10.1016/j.jksus.2022.102515

30.Zhu, Z.-H., Chao, C.-J., Lu, X.-Y., Xiong, Y.G. 1986. *Paulownia in China: Cultivation and Utilization*; Asian Network for Biological Sciences and International Development Research Centre: Beijing, China.

31.Yavorov, N., Petrin, S., Valchev, I., et al. 2015. Potential of Fast Growing Poplar, Willow and Paulownia for Bioenergy Production. Bulg. Chem. Commun. 47, 5–9.