

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР І ЦУКРОВИХ БУРЯКІВ

Кваліфікаційна наукова праця
на права рукопису

ЛЕВЧУК Тимур Анзорович

ДИСЕРТАЦІЯ

РІСТ І ПРОДУКТИВНІСТЬ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПЛАНТАЦІЙ
ВЕРБИ ПРУТОВИДНОЇ (*SALIX VIMINALIS L.*)
В УМОВАХ ПРАВОБЕРЕЖНОГО ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ

201 «Агрономія»

20 «Аграрні науки і продовольство»

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

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


_____ Т.А. Левчук

Науковий керівник: **Фучило Ярослав Дмитрович** доктор с. – г. наук, професор

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Левчук Т.А. «Ріст і продуктивність енергетичних плантацій верби прутувидної (*Salix viminalis* L.) в умовах Правобережного Лісостепу України» – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 201 – «Агрономія» галузь знань – 20 «Аграрні науки та продовольство». Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України, Київ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена науковому обґрунтуванню добору перспективних сортів верби прутувидної (*Salix viminalis* L.) для створення енергетичних плантацій в умовах Правобережного Лісостепу України. Актуальність теми зумовлена необхідністю розширення сировинної бази для виробництва твердого біопалива, підвищення енергетичної незалежності держави, раціонального використання малопродуктивних земель і впровадження відновлюваних джерел енергії в аграрному секторі.

Метою досліджень було оцінити біологічні, ростові, продуктивні та якісні особливості різних сортів верби прутувидної, визначити їх біоенергетичну й економічну ефективність та удосконалити наукові підходи до створення і використання енергетичних плантацій в умовах Правобережного Лісостепу України.

Об'єктом дослідження були процеси росту, розвитку та формування продуктивності енергетичних плантацій верби прутувидної залежно від сортових особливостей і циклічності заготівлі біомаси. Предметом дослідження були сорти 'Tordis', 'Inger', 'Wilhelm', '082' ('Warm-maz'), '1047' ('Gigantea') та '1052', їх біометричні показники, урожайність сирої та сухої біомаси, якісні характеристики сировини, енергетичний вихід та економічна ефективність вирощування.

У процесі виконання роботи застосовували польовий, лабораторний, математично-статистичний і розрахунково-порівняльний методи досліджень. Польові дослідження передбачали спостереження за ростом і розвитком рослин, визначення біометричних показників, урожайності біомаси та особливостей відростання після зрізування. Лабораторні методи використовували для оцінювання вагових параметрів рослин і хімічного складу біомаси. Математично-статистичні методи застосовували для обробки експериментальних даних, а розрахунково-порівняльні – для визначення економічної та біоенергетичної ефективності вирощування досліджуваних сортів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що вперше в умовах Правобережного Лісостепу України встановлено особливості росту, розвитку та формування продуктивності шести сортів верби прутovidної за різних циклів вирощування і заготівлі енергетичної біомаси. Уточнено сортові відмінності за інтенсивністю росту, куцистістю, формуванням пагонів, накопиченням сухої речовини та енергетичною продуктивністю. Набули подальшого розвитку наукові положення щодо ефективності використання різних ротаційних циклів вирощування верби прутovidної для забезпечення максимальної продуктивності та біологічної стійкості енергетичних плантацій.

Встановлено, що за трирічного циклу вирощування найбільш продуктивними були сорти '1052', '1047' ('Gigantea') та 'Inger'. Найвищу урожайність сухої біомаси забезпечив сорт '1052' – 27,81 т/га. Дещо нижчі показники отримано у сортів '1047' ('Gigantea') – 26,06 т/га та 'Inger' – 23,77 т/га. Сорт '082' ('Warm-maz') сформував 21,24 т/га сухої біомаси. Значно нижчою продуктивність була у сортів 'Wilhelm' – 13,61 т/га та 'Tordis' – 8,85 т/га. Перевага найбільш продуктивних сортів була зумовлена вищою куцистістю, значною масою одного куца та більшим виходом сухої речовини з одиниці площі.

Доведено, що першу заготовлю енергетичної біомаси в умовах Правобережного Лісостепу України доцільно проводити переважно у чотирирічному віці, коли рослини формують достатньо розвинену кореневу систему та надземну масу. Надалі, після формування потужної кореневої системи, ротаційний цикл може бути скорочений до двох-трьох років. Зрізування старших насаджень сприяло активному відростанню однорічної біомаси та підвищенню кущистості рослин. Найвищу урожайність сухої однорічної біомаси після зрізування сформував сорт 'Inger' – 8,0 т/га/рік.

Встановлено тісні кореляційні зв'язки між біометричними показниками пагонів і формуванням біомаси. Зокрема, для сорту 'Tordis' найтісніший зв'язок виявлено між масою одного пагона та його діаметром біля основи, що підтверджує важливість діаметричних параметрів як інформативних критеріїв прогнозування продуктивності біомаси.

Оцінювання якісного складу біомаси показало, що досліджувані сорти верби прутовидної є цінною лігноцелюлозною сировиною для виробництва твердого біопалива. Основними структурними компонентами біомаси є целюлоза, геміцелюлоза та лігнін. Якісні показники біомаси між сортами відрізнялися незначно, тому головним чинником формування енергетичного виходу з одиниці площі була урожайність сухої речовини.

Найвищий розрахунковий вихід енергії з трирічної сухої біомаси забезпечив сорт '1052' – 445,0 ГДж/га, або 148,3 ГДж/га/рік. Сорт '1047' ('Gigantea') сформував 417,0 ГДж/га, або 139,0 ГДж/га/рік, а сорт 'Inger' — 380,3 ГДж/га, або 126,8 ГДж/га/рік. Це підтверджує високу біоенергетичну ефективність зазначених сортів і доцільність їх використання для створення енергетичних плантацій.

Економічна оцінка засвідчила, що найбільш ефективним є вирощування сортів із найвищою урожайністю сухої біомаси. Найвищий умовно чистий

прибуток і рівень рентабельності забезпечив сорт ‘1052’ – відповідно 48,43 тис. грн/га і 138,4 %. Високі економічні показники також отримано для сортів ‘1047’ (‘Gigantea’) – 43,18 тис. грн/га умовно чистого прибутку і 123,4 % рентабельності та ‘Inger’ – 36,31 тис. грн/га і 103,7 %.

Практичне значення одержаних результатів полягає в обґрунтуванні добору сортів верби прутовидної, найбільш придатних для вирощування на енергетичних плантаціях у Правобережному Лісостепу України. Для виробничого використання рекомендовано сорти ‘1052’, ‘1047’ (‘Gigantea’) та ‘Inger’, які забезпечують високий вихід сухої біомаси, значну енергетичну продуктивність, позитивний економічний результат і придатність біомаси до використання як твердого біопалива.

Ключові слова: верба прутовидна, *Salix viminalis* L., енергетичні плантації, біомаса, суха речовина, урожайність, ротаційний цикл, біоенергетична ефективність, економічна ефективність, тверде біопаливо, Правобережний Лісостеп України.

ABSTRACT

Levchuk T. A. “**Growth and Productivity of Energy Plantations of Basket Willow (*Salix viminalis* L.) under the Conditions of the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine**” – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in speciality 201 “Agronomy”, field of knowledge 20 “Agricultural Sciences and Food”. Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Kyiv, 2026.

The dissertation is devoted to the scientific substantiation of the selection of promising basket willow (*Salix viminalis* L.) varieties for the establishment of energy plantations under the conditions of the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine. The relevance of the topic is determined by the need to expand the raw material base for

solid biofuel production, increase the energy independence of the state, ensure the rational use of low-productive lands, and introduce renewable energy sources into the agricultural sector.

The aim of the research was to evaluate the biological, growth, productive and qualitative characteristics of different basket willow varieties, determine their bioenergy and economic efficiency, and improve scientific approaches to the establishment and use of energy plantations under the conditions of the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine.

The object of the research was the processes of growth, development and productivity formation of basket willow energy plantations depending on varietal characteristics and biomass harvesting cycles. The subject of the research included the varieties 'Tordis', 'Inger', 'Wilhelm', '082' ('Warm-maz'), '1047' ('Gigantea') and '1052', their biometric parameters, yield of fresh and dry biomass, qualitative characteristics of raw material, energy output and economic efficiency of cultivation.

In the course of the research, field, laboratory, mathematical-statistical and calculation-comparative methods were used. Field studies included observations of plant growth and development, determination of biometric parameters, biomass yield and regrowth characteristics after cutting. Laboratory methods were used to assess plant weight parameters and the chemical composition of biomass. Mathematical-statistical methods were applied to process experimental data, while calculation-comparative methods were used to determine the economic and bioenergy efficiency of cultivating the studied varieties.

The scientific novelty of the obtained results lies in the fact that, for the first time under the conditions of the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine, the features of growth, development and productivity formation of six basket willow varieties were established under different cycles of cultivation and harvesting of energy biomass. Varietal differences in growth intensity, tillering capacity, shoot formation, dry matter

accumulation and energy productivity were clarified. Scientific provisions concerning the efficiency of using different rotation cycles of basket willow cultivation to ensure maximum productivity and biological stability of energy plantations were further developed.

It was established that, under a three-year cultivation cycle, the most productive varieties were '1052', '1047' ('Gigantea') and 'Inger'. The highest dry biomass yield was provided by the variety '1052' – 27.81 t/ha. Slightly lower values were obtained for '1047' ('Gigantea') – 26.06 t/ha and 'Inger' – 23.77 t/ha. The variety '082' ('Warmmaz') produced 21.24 t/ha of dry biomass. Significantly lower productivity was recorded for 'Wilhelm' – 13.61 t/ha and 'Tordis' — 8.85 t/ha. The advantage of the most productive varieties was due to higher tillering capacity, greater individual bush weight and higher dry matter output per unit area.

It was proven that, under the conditions of the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine, the first harvesting of energy biomass should preferably be carried out at the age of four years, when plants have formed a sufficiently developed root system and aboveground mass. Subsequently, after the formation of a powerful root system, the rotation cycle may be shortened to two or three years. Cutting older plantations promoted active regrowth of annual biomass and increased plant tillering. The highest yield of dry annual biomass after cutting was formed by the variety 'Inger' – 8.0 t/ha/year.

Close correlations were established between the biometric parameters of shoots and biomass formation. In particular, for the variety 'Tordis', the closest relationship was found between the weight of one shoot and its basal diameter, confirming the importance of diameter parameters as informative criteria for predicting biomass productivity.

The assessment of the qualitative composition of biomass showed that the studied basket willow varieties are valuable lignocellulosic raw material for solid biofuel

production. The main structural components of biomass are cellulose, hemicellulose and lignin. The qualitative indicators of biomass differed only slightly between varieties; therefore, the main factor determining energy output per unit area was dry matter yield.

The highest calculated energy output from three-year dry biomass was provided by the variety '1052' – 445.0 GJ/ha, or 148.3 GJ/ha/year. The variety '1047' ('Gigantea') produced 417.0 GJ/ha, or 139.0 GJ/ha/year, while 'Inger' produced 380.3 GJ/ha, or 126.8 GJ/ha/year. These results confirm the high bioenergy efficiency of these varieties and the feasibility of their use for establishing energy plantations.

The economic assessment showed that the cultivation of varieties with the highest dry biomass yield was the most efficient. The highest conditional net profit and profitability level were provided by the variety '1052' – 48.43 thousand UAH/ha and 138.4%, respectively. High economic indicators were also obtained for '1047' ('Gigantea') – 43.18 thousand UAH/ha of conditional net profit and 123.4% profitability, and for 'Inger' – 36.31 thousand UAH/ha and 103.7%, respectively.

The practical significance of the obtained results lies in the substantiation of the selection of basket willow varieties most suitable for cultivation on energy plantations under the conditions of the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine. For practical production use, the varieties '1052', '1047' ('Gigantea') and 'Inger' are recommended, as they provide high dry biomass output, significant energy productivity, positive economic results and suitability of biomass for use as solid biofuel.

Keywords: basket willow, *Salix viminalis* L., energy plantations, biomass, dry matter, yield, rotation cycle, bioenergy efficiency, economic efficiency, solid biofuel, Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine.

Список публікацій за темою дисертації

Статті у наукових фахових виданнях

1. Фучило Я.Д., Левчук Т.А. Продуктивність верби прутувидної залежно від сортових особливостей та періодичності заготівлі біомаси. // Біоенергетика / Bioenergy. № 1 (23). 2024. С. 16–18.
2. Левчук Т.А., Фучило Я.Д. Продуктивність шести сортів верби прутувидної за трирічного циклу заготівлі біомаси. Біоенергетика / Bioenergy. № 2 (24). 2024. С. 35 – 37. <https://doi.org/10.47414/be.2024.No2.pp35-37>
3. Fuchylo Ya. D., Levchuk T. A. Growth characteristics of foreign willow (*Salix viminalis* L.) varieties on leached chernozems of the Central Forest – Steppe. Plant Varieties Studying and Protection. № 2 (21). 2025. С. 94 – 99. DOI: <https://doi.org/10.21498/2518-1017.21.2.2025.333455>

Тези доповідей на наукових конференціях

4. Фучило Я. Д., Левчук Т. А., Машир М. А. Ріст і продуктивність деяких сортів верби прутувидної на вилугуваних чорноземах Правобережного Лісостепу. // Лісівнича освіта і наука: стан, проблеми та перспективи розвитку. Збірник матеріалів V Міжнародної науково – практичної конференції студентів, магістрів, аспірантів, молодих вчених і викладачів, м. Малин, 21 березня 2023 року. Малин: Вид – во МФК, 2023. С. 268
5. Левчук Тимур, Фучило Ярослав, Карпович Марина, Дзиба Богдан. Ріст деяких сортів верби прутувидної на вилугуваних чорноземах. Матеріали Студентської науково – практичної конференції «Ліс – об’єкт наукових досліджень» (24 квітня 2024 року, Малинський фаховий коледж). С.73 – 79.

6. Фучило Я.Д., Бодрусь О.О., Бодрусь О.Ю., Кирилко Я.О. Особливості вирощування однорічних живцевих саджанців тополі у Правобережному Лісостепу // Лісівнича освіта і наука: стан, проблеми та перспективи розвитку: Збірник матеріалів учасників Міжнародної науково – практичної конференції студентів, магістрів, аспірантів, молодих вчених і викладачів (19 травня 2022 р., м.Малин). Малин: Вид – во МФК, 2022. С. 150 – 153.

7. Левчук Тимур, Ганженко Олександр, Фучило Ярослав. Ріст і продуктивність деяких сортів верби прутovidної на вилугуваних чорноземах Правобережного Лісостепу. Лісовирощування: історична та інноваційна діяльність у галузі лісового господарства [електронне видання] : збірник матеріалів II Всеукраїнської науково – практичної конференції до 205 – річчя з дня народження В. Є. фон Граффа, м. Овруч – Малин, 08 листопада 2024 року. Малин : Малинський фаховий коледж. Видавництво: МФК, 2024. С. 117 – 118.

8. Левчук Т., Фучило Я. Динаміка росту іноземних сортів верби прутovidної на вилугуваних чорноземах центрального Лісостепу України. Актуальні питання розвитку сільського господарства: теорія і практика: матеріали Міжнародної науково – практичної конференції (м. Івано – Франківськ, 9 жовтня 2025 року). Оброшине: Видавництво інституту сільського господарства Карпатського регіону, 2025. С. 90 – 93.

9. Присяжнюк О.І., Фучило Я.Д., Левчук Т.А. Оцінка адаптації деяких клонів енергетичної верби до ґрунтово – кліматичних умов за ефективністю функціонування фотосинтетичного апарату. Матеріали Міжнародної науково – практичної конференції «Поліські наукові читання» – 2025 м. Чернігів, 02–04 грудня 2025 р. Чернігів: НУ "Чернігівський колегіум" ім.Т.Г.Шевченка, 2025. С. 166 – 167.

ЗМІСТ

| | С. |
|--|----|
| ВСТУП | 13 |
| РОЗДІЛ 1 СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВЕРБИ ПРУТОВИДНОЇ В БІОЕНЕРГЕТИЦІ (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ) | 18 |
| 1.1. Глобальний і регіональний стан використання біомаси в енергетиці..... | 18 |
| 1.2. Основні агротехнічні заходи вирощування верби прутовидної та їх вплив на урожайність енергетичної біомаси..... | 21 |
| 1.3. Сортові ресурси, біолого – екологічні особливості та продуктивний потенціал верби прутовидної..... | 27 |
| 1.4. Якісні, енергетичні, екологічні та економічні аспекти використання біомаси верби прутовидної..... | 32 |
| РОЗДІЛ 2. ПРОГРАМА, МЕТОДИКА ТА УМОВИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ..... | 41 |
| 2.1 Місце і умови проведення досліджень..... | 41 |
| 2.2 Коротка характеристика досліджуваних культиварів верби прутовидної..... | 49 |
| 2.3 Методика проведення досліджень | 51 |
| РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ДОСЛІДЖУВАНИХ СОРТІВ <i>SALIX VIMINALIS</i> L. ЗА МОРФОЛОГІЧНИМИ ОЗНАКАМИ АСИМІЛЯЦІЙНОГО АПАРАТУ ТА ХІМІЧНИМ СКЛАДОМ БІОМАСИ..... | 56 |
| 3.1. Морфологічні ознаки асиміляційного апарату сортів <i>Salix viminalis</i> L..... | 58 |
| 3.2. Кластерна оцінка сортів за морфологічними ознаками..... | 61 |
| 3.3. Порівняльна характеристика сортів польської та шведської селекції..... | 65 |
| РОЗДІЛ 4. РІСТ, РОЗВИТОК І ПРОДУКТИВНІСТЬ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПЛАНТАЦІЙ ВЕРБИ ПРУТОВИДНОЇ..... | 71 |
| 4.1. Особливості росту й розвитку сортів верби прутовидної в умовах Правобережного Лісостепу України..... | 72 |
| 4.2. Відростання однорічної біомаси після зрізування шестирічних плантацій..... | 76 |
| 4.3. Продуктивність восьмирічних плантацій верби прутовидної..... | 77 |
| 4.4. Хід росту пагонів за висотою і діаметром та обґрунтування строків заготівлі біомаси..... | 81 |
| 4.5. Продуктивність однорічної та трирічної біомаси після зрізування насаджень верби прутовидної..... | 88 |
| 4.6. Взаємозв'язки між біометричними показниками трирічних пагонів верби прутовидної..... | 94 |

| | |
|---|-----|
| РОЗДІЛ 5. ЯКІСНА ХАРАКТЕРИСТИКА БІОМАСИ СОРТІВ ВЕРБИ ПРУТОВИДНОЇ ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ..... | 103 |
| 5.1. Оцінка якісного складу біомаси сортів верби прутовидної за структурними компонентами та мінеральними елементами..... | 103 |
| 5.2. Енергетична цінність біомаси сортів верби прутовидної..... | 109 |
| 5.3. Комплексна оцінка перспективності сортів для створення енергетичних плантацій..... | 112 |
| 5.4. Економічна та енергетична ефективність вирощування перспективних сортів верби прутовидної..... | 116 |
| ВИСНОВКИ..... | 125 |
| РЕКОМЕНДАЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ..... | 129 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 130 |
| ДОДАТКИ..... | 151 |

ВСТУП

Територія України відзначається сприятливими ґрунтово – кліматичними умовами та достатнім потенціалом для динамічного розвитку біоенергетики, яка є дуже вагомим фактором не лише для пом'якшення наслідків зміни клімату, але й для забезпечення незалежності та економічного зростання держави [**Error! Reference source not found., Error! Reference source not found., Error! Reference source not found.**]. В Україні можна вирощувати багато високопродуктивних енергетичних культур, тому важливе значення має аналіз світових рослинних ресурсів і добір найперспективніших рослин для використання у біоенергетичних цілях [**Error! Reference source not found., Error! Reference source not found., Error! Reference source not found.**]. Серед таких культур важлива роль належить вербі прутовидній (*Salix viminalis* L.), яку можна вирощувати на малопродуктивних достатньо зволжених землях і отримувати при цьому значні обсяги енергетичної біомаси. Перевагою деревини верби є її висока тепловіддача та низький вміст шкідливих речовин, що виділяються при згорянні [**Error! Reference source not found.**].

Зараз високу продуктивність біомаси для виробництва біопалива здатні забезпечити нові сорти та гібриди, виведені, як правило, на основі верби прутовидної, які за ефективністю значно переважають існуючі. Провідними науковцями в галузі рослинництва та біоенергетики проводиться робота з впровадження у виробництво високопродуктивних форм верби, але при цьому важливим завданням є вивчення особливостей їх росту і розвитку в різних ґрунтово – кліматичних зонах України та добір ефективних елементів технології вирощування енергетичних плантацій для конкретних умов.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення наукових основ і практичних пропозицій щодо добору сортів, які найбільш придатні для вирощування на енергетичних плантаціях у ґрунтово – кліматичних умовах України та

розроблення ефективних технологічних схем їх створення, вирощування та експлуатації.

Дана робота спрямована на добір найперспективніших сортів *Salix viminalis* L. з точки зору продуктивності енергетичної біомаси та елементів її вирощування для умов Лісостепу України.

Мета і завдання дослідження. Мета досліджень – оцінити біологічні та екологічні особливості різних сортів верби прутовидної та удосконалити технологію вирощування їх енергетичних плантацій в умовах Правобережного Лісостепу

Для досягнення поставленої мети передбачалось вирішити такі основні **завдання:**

- проаналізувати стан і перспективи вирощування верби як сировини для виробництва твердого біопалива в Україні та світі;
- встановити особливості росту та накопичення енергетичної біомаси плантаціями досліджуваних сортів верби прутовидної за різних термінів заготівлі біомаси;
- встановити динаміку накопичення енергії у біомасі плантацій досліджуваних сортів верби прутовидної за різної циклічності збирання урожаю біомаси;
- оцінити кількісний і якісний склад енергетичної біомаси досліджуваних сортів верби прутовидної;
- здійснити енергетичну та економічну оцінки ефективності використання різних сортів верби прутовидної на енергетичні цілі.

Об’єкт дослідження – процеси росту і формування продуктивності енергетичних плантацій верби залежно від сортових особливостей, технології їх вирощування та циклічності заготівлі біомаси.

Предмет дослідження – сорти верби прутovidної ('Tordis', 'Inger', 'Wilhelm', '082', '1047', '1057'), біометричні показники рослин, показники продуктивності та якості енергетичної біомаси, елементи технології вирощування, економічна та енергетична оцінки вирощування біомаси верби

Методи дослідження. У процесі досліджень застосовувалися такі методи:

- **лабораторний** – для вагових параметрів дослідних рослин та проведення хімічного аналізу їх біомаси;
- **польовий** – спостереження за особливостями росту і розвитку рослин, визначення продуктивності згідно чинних методик;
- **математично – статистичний** – для статистичної оцінки результатів досліджень;
- **розрахунково – порівняльний** – для встановлення економічної ефективності досліджуваних факторів.

Наукова новизна дослідження полягає в наступному:

Вперше в умовах Правобережного Лісостепу України:

– встановлено особливості росту й розвитку плантацій шести сортів верби прутovidної за різних циклів вирощування і заготівлі енергетичної біомаси.

– *удосконалено* технологію вирощування енергетичних плантацій верби прутovidної в досліджуваних ґрунтово – кліматичних умовах.

Отримали подальший розвиток питання ефективності застосування різних циклів вирощування енергетичної біомаси плантацій верби прутovidної для забезпечення максимальної їх продуктивності та біологічної стійкості.

Практичне значення отриманих результатів. За результатами експериментальних досліджень було рекомендовано сорти верби прутovidної придатні для вирощування на енергетичних плантаціях в умовах Правобережного Лісостепу України та удосконалена технологія їх вирощування.

Особистий внесок здобувача. Здобувачем самостійно опрацьовано та систематизовано наукові джерела вітчизняних і зарубіжних авторів за темою дисертаційної роботи, узагальнено сучасний стан досліджуваної проблеми, обґрунтовано актуальність наряду досліджень, визначено мету, сформульовано завдання та розроблено програму наукової роботи. Автор брав безпосередню участь у плануванні, закладанні та проведенні основних польових дослідів, виконанні обліків, спостережень і вимірювань. Отримані експериментальні дані здобувачем опрацьовано, проаналізовано із застосуванням методів статистичної обробки, на їх основі сформульовано основні наукові положення, висновки та практичні рекомендації виробництву.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідались і отримали позитивну оцінку на засіданнях науково – методичної комісії Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків у 2023 – 2026 рр., V Міжнародній науково – практичній конференції студентів, магістрів, аспірантів, молодих вчених і викладачів, (м. Малин, 21 березня 2023 року), студентській науково – практичній конференції «Ліс – об’єкт наукових досліджень» (24 квітня 2024 року, Малинський фаховий коледж), Міжнародній науково – практичній конференції студентів, магістрів, аспірантів, молодих вчених і викладачів (19 травня 2022 р., м.Малин), II Всеукраїнській науково – практичній конференції до 205 – річчя з дня народження В. Є. фон Граффа, (м. Овруч – Малин, 08 листопада 2024 року), Міжнародній науково – практичній конференції (м. Івано – Франківськ, 9 жовтня 2025 року), Міжнародної науково – практичної конференції «Поліські наукові читання» – 2025 (м. Чернігів, 02–04 грудня 2025 р.)

Публікації. Основні результати дослідження за матеріалами дисертації опубліковано в трьох працях у фахових виданнях та шести тезах доповіді, які засвідчують їх апробацію.

Структура та обсяг роботи. Матеріали дисертації викладено на 166 стор. комп'ютерного набору. Дисертація містить анотацію, вступ, 5 розділів, висновки, рекомендації виробництву, список використаних джерел, який нараховує 189 найменувань, у т.ч. 163 латиницею, додатків. Матеріали подані у 21 таблицях та ілюстровано 15 рисунками.

РОЗДІЛ 1

СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ВЕРБИ ПРУТОВИДНОЇ В БІОЕНЕРГЕТИЦІ (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ)

1.1. Глобальний і регіональний стан використання біомаси в енергетиці

Світовий енергетичний сектор перебуває у фазі структурної трансформації, зумовленої необхідністю скорочення викидів парникових газів, підвищення енергетичної безпеки та зменшення залежності від викопних енергоносіїв. У цьому контексті біомаса розглядається як один із найбільш гнучких видів відновлюваної енергії, оскільки може використовуватися для виробництва тепла, електроенергії, твердого, рідкого та газоподібного біопалива [1–8]. На відміну від сонячної та вітрової енергії, біомаса має важливу перевагу – її можна накопичувати, транспортувати, зберігати й використовувати відповідно до сезонної або виробничої потреби [9–14].

У міжнародних енергетичних стратегіях біоенергетику розглядають як важливу складову декарбонізації економіки, насамперед у тих секторах, де безпосередня електрифікація є технологічно обмеженою, економічно складною або потребує значних інвестицій у модернізацію інфраструктури. До таких напрямів належать централізоване й локальне тепlopостачання, промислові теплові процеси, агропромислове виробництво, частково транспортний сектор, а також енергозабезпечення сільських територій. Біомаса може використовуватися для часткового заміщення вугілля, природного газу й нафтопродуктів, зменшуючи залежність від викопних енергоносіїв та сприяючи підвищенню енергетичної безпеки держав і регіонів [15–18].

Особливе значення біоенергетика має для локальних енергетичних систем, де джерела біомаси розташовані безпосередньо поблизу споживача. У таких умовах зменшуються витрати на транспортування сировини, підвищується ефективність використання місцевих ресурсів і створюються додаткові економічні можливості для сільських громад, фермерських господарств та агропромислових підприємств. Біомаса може бути використана у вигляді деревної тріски, пелет, брикетів, а також як сировина для виробництва біогазу, рідких біопалив або теплової енергії. Водночас її перевагою є можливість інтеграції у наявні системи тепlopостачання, особливо в регіонах, де є достатня кількість сільськогосподарських, лісових або спеціально вирощених енергетичних ресурсів [19–22].

Разом із тим розвиток біоенергетики потребує дотримання принципів сталості, оскільки її ефективність визначається не лише обсягами доступної сировини, а й екологічною доцільністю її виробництва та використання. Важливими умовами є раціональне розміщення енергетичних плантацій, недопущення конкуренції з продовольчим виробництвом, збереження родючості ґрунтів, підтримання біорізноманіття, оптимізація водного режиму та мінімізація викидів парникових газів упродовж усього життєвого циклу біопалива. Саме тому оцінювання біоенергетичних культур має охоплювати не лише їх урожайність, а й енергетичну віддачу, вуглецевий баланс, потребу в ресурсах, логістичні витрати та вплив на агроекосистеми [23–26].

Водночас ефективність біоенергетики значною мірою залежить від стабільності сировинної бази, організації заготівлі, зберігання і транспортування біомаси, а також від економічної конкурентоспроможності порівняно з іншими джерелами енергії. Для деревних енергетичних культур, зокрема верби прутувидної, важливими перевагами є багаторічний характер використання плантацій, здатність рослин до відростання після зрізування, можливість

механізованого збирання та формування значних обсягів лігноцелюлозної сировини. Проте широке впровадження таких культур потребує добору адаптованих сортів, оптимізації агротехнічних заходів і наукового обґрунтування строків заготівлі біомаси відповідно до конкретних ґрунтово – кліматичних умов [27, 28]. У країнах Європейського Союзу розвиток біоенергетики тісно пов'язаний із політикою кліматичної нейтральності, енергетичної незалежності та переходу до циркулярної біоекономіки. Значна увага приділяється використанню місцевої біомаси, деревних відходів, аграрних решток і спеціально створених енергетичних плантацій. Особливої актуальності набувають короткоротаційні деревні культури, зокрема верба, тополя та робінія, які здатні забезпечувати стабільне надходження лігноцелюлозної сировини упродовж тривалого періоду експлуатації плантацій [29–36].

Для України питання розвитку біоенергетики має не лише екологічне, а й стратегічне значення. Висока залежність від імпортованих енергоносіїв, потреба в диверсифікації джерел енергії та наявність значних площ сільськогосподарських земель створюють передумови для ширшого використання біомаси. Україна має достатній потенціал для вирощування багаторічних енергетичних культур, зокрема на малопродуктивних, перезвожених або частково деградованих землях, які не завжди доцільно використовувати під традиційні продовольчі культури [37–44].

Особливо перспективним напрямом для умов України є вирощування деревних енергетичних культур, здатних формувати значний обсяг сухої речовини за короткий період. До таких культур належить верба прутовидна (*Salix viminalis* L.), яка характеризується високою інтенсивністю росту, здатністю до багаторазового відростання після зрізування, відносно невисокими вимогами до ґрунтів і можливістю вирощування в різних ґрунтово – кліматичних зонах [45–52]. Водночас продуктивність цієї культури істотно залежить від сортового

складу, технології створення плантацій, густоти садіння, удобрення та тривалості циклу заготівлі біомаси [53–60].

Екологічна роль енергетичних плантацій верби не обмежується лише виробництвом біопалива. Такі насадження можуть виконувати ґрунтозахисну, водорегулювальну, фітомеліоративну та вуглецедепонувальну функції. У літературі підкреслюється, що вербові плантації можуть сприяти зменшенню ерозійних процесів, поліпшенню структури агроландшафтів, підвищенню біорізноманіття та використанню земель, малоприсадибних для інтенсивного землеробства [61–68].

Отже, світові й регіональні тенденції розвитку біоенергетики свідчать про зростання ролі біомаси як відновлюваного енергетичного ресурсу. Для України, зокрема для Правобережного Лісостепу, актуальним є наукове обґрунтування добору високопродуктивних сортів верби прутовидної та технологічних елементів її вирощування, що забезпечить стабільне виробництво енергетичної біомаси й підвищення енергетичної самодостатності аграрного сектору [69–76].

1.2. Основні агротехнічні заходи вирощування верби прутовидної та їх вплив на урожайність енергетичної біомаси

Технологія вирощування верби прутовидної на енергетичних плантаціях включає комплекс взаємопов'язаних агротехнічних заходів, від правильного поєднання яких залежить продуктивність насаджень упродовж усього періоду їх експлуатації. До основних елементів технології належать добір високопродуктивного й адаптованого сорту, підготовка ґрунту, вибір оптимальної схеми садіння та густоти насаджень, використання якісного садивного матеріалу, система догляду за плантацією, удобрення, контроль бур'янів, захист від шкідників і хвороб, а також визначення оптимального строку зрізування біомаси [77–84].

Початковий етап створення плантації має вирішальне значення, оскільки саме в цей період формується густина стояння рослин, відбувається укорінення живців і закладається потенціал майбутньої продуктивності. Якість садивного матеріалу, його життєздатність, розмір живців, ступінь здерев'яніння та умови зберігання до садіння безпосередньо впливають на приживлюваність рослин і рівномірність формування насаджень. Низька якість живців або порушення технології садіння можуть призводити до зрідження плантації, нерівномірного росту рослин і зниження врожайності біомаси вже в перші роки вирощування [85–87].

Важливим технологічним чинником є схема садіння та густина насаджень. За надмірного загущення рослини швидше зникають міжряддя й ефективніше пригнічують бур'яни, однак між ними посилюється конкуренція за світло, вологу та елементи живлення, що може зменшувати діаметр пагонів і масу окремого стебла. За меншої густоти садіння рослини, як правило, формують потужніші пагони, однак загальна продуктивність плантації залежить від кількості рослин на одиниці площі та їхньої збереженості. Тому оптимальна густина має забезпечувати баланс між кількістю рослин, інтенсивністю їх росту та кінцевою урожайністю сухої біомаси [88–90].

Система догляду за плантаціями верби прутувидної особливо важлива в перші роки після садіння, коли рослини ще не сформували достатньо розвинутої кореневої системи й листового апарату. У цей період значної шкоди можуть завдавати бур'яни, які конкурують із молодими рослинами за вологу, поживні речовини та світло. Ефективний контроль бур'янів у початковий період росту сприяє кращому укоріненню живців, підвищенню збереженості рослин і формуванню більш вирівняних насаджень. У подальші роки, після змикання крон і формування потужної надземної маси, конкурентна здатність верби щодо бур'янів істотно зростає [77, 82, 85].

Удобрення є одним із найбільш дискусійних елементів технології вирощування енергетичної верби. З одного боку, внесення елементів живлення, особливо азоту, може істотно підвищувати інтенсивність росту пагонів, площу листової поверхні та урожайність біомаси. З іншого боку, ефективність удобрення залежить від родючості ґрунту, віку насаджень, фази розвитку рослин, рівня вологозабезпечення та здатності кореневої системи засвоювати поживні речовини. Тому дози добрив мають бути науково обґрунтованими й адаптованими до конкретних умов вирощування, щоб забезпечити приріст продуктивності без надмірного екологічного та економічного навантаження [78–84].

Не менш важливим є встановлення оптимального строку зрізування біомаси. Періодичність заготівлі визначає не лише загальний вихід сухої речовини, а й біологічний стан насаджень, здатність рослин до відростання та тривалість продуктивного використання плантації. Занадто короткий цикл зрізування може не забезпечити повної реалізації потенціалу сорту, тоді як надмірне подовження ротації часто супроводжується зниженням середньорічного приросту, погіршенням фітосанітарного стану, ламкістю пагонів і частковим відмиранням рослин. Отже, оптимальний строк заготівлі біомаси має визначатися з урахуванням сортових особливостей, віку насаджень, умов вирощування та цільового напрямку використання біомаси [85–90].

Таким чином, технологія вирощування верби прутувидної є багатокомпонентною системою, у якій кожен агротехнічний захід впливає на реалізацію продуктивного потенціалу сорту. Найвищої ефективності енергетичних плантацій можна досягти лише за поєднання адаптованого сортового складу, якісного садивного матеріалу, оптимальної густоти насаджень, належного догляду, збалансованого удобрення та науково обґрунтованої періодичності зрізування біомаси [77–90]. Підготовка ґрунту має особливе

значення на етапі закладання плантації, оскільки верба є багаторічною культурою і помилки під час створення насаджень можуть негативно впливати на їх продуктивність упродовж багатьох років. Основними завданнями підготовки ґрунту є поліпшення водно – повітряного режиму, знищення багаторічних бур'янів, створення сприятливих умов для укорінення живців і початкового росту пагонів [91–96]. На ґрунтах із достатнім вологозабезпеченням і помірним рівнем родючості верба здатна швидко формувати кореневу систему та забезпечувати активне відростання надземної частини [97–101].

Схема садіння і густота насаджень є одними з найважливіших технологічних чинників, що визначають просторову структуру, архітектоніку плантації та рівень продуктивності верби прутувидної. У практиці короткоротаційного вирощування енергетичної верби часто застосовують схеми садіння спареними рядами, які забезпечують можливість механізованого догляду за насадженнями, ефективного контролю бур'янів у міжряддях і подальшої механізованої заготівлі біомаси. Така система розміщення рослин дає змогу поєднати достатню густоту стояння з технологічною зручністю експлуатації плантації [102–104].

Відстань між рядами, кулісами та рослинами в рядку безпосередньо впливає на площу живлення кожної рослини, рівень внутрішньовидової конкуренції, інтенсивність використання світла, вологи й елементів живлення. За меншої відстані між рослинами швидше відбувається змикання крон, що сприяє пригніченню бур'янів і повнішому використанню площі плантації. Водночас надмірне загушення може посилювати конкуренцію між рослинами, обмежувати розвиток окремих пагонів, зменшувати їх діаметр і масу, а також ускладнювати доступ повітря й світла всередину насадження [105–108].

Густота садіння впливає не лише на кількість рослин на одиниці площі, а й на характер формування куща. За підвищеної густоти насаджень зазвичай зростає

загальна кількість пагонів на гектар, що може позитивно впливати на сумарну врожайність біомаси у перші роки вирощування. Проте за таких умов окремі пагони часто формуються тоншими, менш масивними, а їх середній діаметр і маса одного стебла зменшуються. За меншої густоти рослини мають більшу площу живлення, краще освітлення та нижчий рівень конкуренції, тому можуть формувати потужніші пагони з більшим діаметром і масою, однак загальна кількість продуктивних стебел на одиниці площі може бути нижчою [109–111].

Оптимальна густина насаджень має забезпечувати баланс між кількістю рослин, кількістю пагонів на кущ, розмірами окремих пагонів і загальною врожайністю сухої біомаси. Вибір схеми садіння залежить від сорту, родючості ґрунту, рівня вологозабезпечення, запланованої тривалості ротації та технічних можливостей догляду й збирання. У короткоротаційних плантаціях важливо враховувати, що висока густина може бути ефективною за коротших циклів заготівлі, тоді як за довшої ротації надмірне загушення може призводити до посилення конкуренції, пригнічення частини пагонів і зниження середньорічного приросту біомаси [112, 113].

Отже, схема садіння і густина насаджень є ключовими елементами технології вирощування верби прутovidної, які визначають не лише початкову структуру плантації, а й подальший характер росту рослин, формування пагонів, збереженість кущів і рівень урожайності сухої біомаси. Тому їх оптимізація має здійснюватися з урахуванням сортових особливостей, умов вирощування та запланованої періодичності заготівлі енергетичної сировини [102–113]. Якість садивного матеріалу істотно впливає на приживлюваність і вирівняність плантацій. Найчастіше вербу розмножують здерев'янілими живцями, які мають забезпечувати достатній запас пластичних речовин, життєздатність бруньок і здатність до швидкого утворення коренів. Довжина, діаметр і фізіологічний стан живців визначають початковий розвиток рослин, а отже – і подальший потенціал

формування біомаси [114–119]. У сучасних дослідженнях підкреслюється, що сортова реакція на умови укорінення може істотно відрізнятись, тому якісний садивний матеріал має поєднуватися з правильним добром культивару [120–123].

Система удобрення є одним із найбільш дискусійних елементів технології вирощування верби. Частина досліджень підтверджує позитивний вплив азотного удобрення на ріст пагонів, площу листової поверхні та урожайність біомаси, тоді як інші автори зазначають, що ефективність удобрення залежить від початкової родючості ґрунту, віку плантації, рівня зволоження та здатності рослин засвоювати елементи живлення [124–131]. Особливо важливим є внесення добрив після зрізування біомаси, коли плантація має добре розвинену кореневу систему і здатна швидко використовувати доступні елементи живлення для формування нових пагонів [132–136].

Азот є ключовим елементом, який впливає на інтенсивність ростових процесів, розвиток листової поверхні та накопичення сухої речовини. Водночас надмірне внесення азоту може бути економічно недоцільним і екологічно ризикованим через можливі втрати нітратів, підвищення зольності біомаси або зміщення балансу елементів живлення [137–142]. Крім азоту, важливу роль відіграють фосфор, калій, кальцій, магній та інші елементи, що впливають на фізіологічний стан рослин, формування деревини й паливні властивості біомаси [143–148].

Догляд за плантаціями у перші роки після садіння спрямований насамперед на зменшення конкуренції бур'янів. Молоді рослини верби в початковий період розвитку можуть поступатися бур'янам за темпами росту, тому чистота міжрядь і рядків є важливою умовою формування рівномірних насаджень [149–152]. У наступні роки, після змикання рослин, конкурентна здатність верби зростає,

однак потреба в контролі бур'янів, шкідників і фітосанітарного стану насаджень зберігається, особливо за тривалого циклу вирощування без зрізування [1–8].

Оптимальна періодичність заготівлі біомаси залежить від сорту, віку плантації та умов вирощування. У практиці часто застосовують дворічні або трирічні цикли, однак окремі дослідження свідчать, що перше зрізування іноді доцільно проводити дещо пізніше, коли рослини повністю сформували кореневу систему і здатні забезпечити вищу продуктивність у наступному циклі [9–16]. Надмірне подовження ротації може призводити до зниження середньорічного приросту, пошкодження пагонів, погіршення фітосанітарного стану та втрати частини біомаси [17–24].

Таким чином, урожайність енергетичної біомаси верби прутovidної формується під впливом комплексу агротехнічних чинників. Найважливішими серед них є сортовий склад, якість садивного матеріалу, схема та густина садіння, система удобрення, догляд за плантацією і строк заготівлі. Для умов Правобережного Лісостепу України актуальним є уточнення оптимального поєднання цих чинників з урахуванням сортових особливостей і регіональних ґрунтово – кліматичних умов [25–32].

1.3. Сортові ресурси, біолого – екологічні особливості та продуктивний потенціал верби прутovidної

Ефективність створення та подальшої експлуатації енергетичних плантацій верби значною мірою визначається сортовими ресурсами. У сучасному виробництві переважають сорти та гібриди, створені на основі верби прутovidної (**Salix viminalis* L.*), оскільки саме цей вид поєднує комплекс цінних біологічних і господарських ознак: швидкий ріст, добру здатність до вегетативного розмноження живцями, інтенсивне відростання після зрізування, формування значної кількості пагонів і високу продуктивність деревної біомаси [33–40]. Завдяки цим особливостям **Salix viminalis* L.* стала однією з основних культур

для створення короткоротаційних енергетичних насаджень у країнах Європи та Північної Америки.

Сортова належність істотно впливає на характер росту й розвитку рослин, їхню адаптивність до умов вирощування та здатність до накопичення сухої речовини. Різні сорти й клони верби можуть суттєво відрізнятися за висотою пагонів, їх діаметром, кількістю стебел на кущ, кущистістю, збереженістю рослин, інтенсивністю відростання після зрізування, а також за тривалістю періоду активного росту. Саме ці ознаки формують архітектоніку насаджень і визначають кінцевий рівень урожайності енергетичної біомаси [41–44].

Важливою характеристикою сортів верби прутувидної є їхня стійкість до несприятливих біотичних і абіотичних чинників. У процесі багаторічного використання енергетичних плантацій рослини можуть зазнавати впливу посухи, надмірного зволоження, низьких температур, механічних пошкоджень, ураження хворобами та пошкодження шкідниками. Тому сорти, які поєднують високу продуктивність із доброю збереженістю рослин і стійкістю до стресових чинників, мають найбільше практичне значення для виробництва [45–47].

Не менш важливим є вплив сорту на якість отриманої біомаси. Генотипові особливості можуть визначати вміст сухої речовини, співвідношення целюлози, геміцелюлози й лігніну, зольність, мінеральний склад і теплотворну здатність деревини. Ці показники мають важливе значення для подальшого використання біомаси як твердого біопалива, а також для виробництва тріски, пелет, брикетів або інших видів біоенергетичної сировини [48]. Отже, добір сортів для енергетичних плантацій має ґрунтуватися не лише на показниках урожайності, а й на комплексній оцінці ростових, адаптивних і якісних характеристик біомаси.

Таким чином, сортові ресурси є одним із базових чинників підвищення продуктивності та стабільності енергетичних плантацій верби прутувидної. Для конкретних ґрунтово – кліматичних умов необхідно добирати сорти, які

забезпечують високу приживлюваність живців, інтенсивне формування пагонів, добру збереженість рослин, стійкість до шкідливих організмів і стабільну якість деревної біомаси. Саме тому порівняльне вивчення сортів і гібридів **Salix viminalis** L. є важливою передумовою наукового обґрунтування створення високопродуктивних енергетичних плантацій [33–48]. У Європі значного поширення набули сорти шведської селекції, які створювалися для умов інтенсивного короткоротаційного вирощування. Для таких сортів характерні висока продуктивність, добра здатність до відростання, відносна стійкість до несприятливих чинників і придатність до механізованої заготівлі [49–56]. Сорти ‘Tordis’, ‘Inger’ та ‘Wilhelm’ часто використовуються у дослідженнях як перспективні культивари, здатні формувати значні обсяги біомаси в умовах помірного клімату [57–63].

Польська селекція верби також має важливе значення для розвитку енергетичних плантацій. Сорти ‘Gigantea’, ‘Marzencinski’ і ‘Warm – maz’ належать до форм, створених або відібраних на основі *Salix viminalis* L. Вони відрізняються між собою за інтенсивністю росту, кількістю пагонів, формою листового апарату та здатністю накопичувати суху біомасу [64–70]. Порівняльні дослідження польських клонів свідчать, що навіть генотипово близькі форми можуть істотно різнитися за ознаками структури врожаю і продуктивністю [71–77].

Важливою біологічно – екологічною ознакою верби є здатність швидко відростати після зрізування. Після заготівлі надземної частини рослини використовують уже сформовану кореневу систему, що забезпечує інтенсивне формування нових пагонів у наступному циклі. Саме тому продуктивність другого й наступних оборотів часто може бути вищою або стабільнішою порівняно з першим циклом, за умови дотримання оптимальної технології та своєчасного удобрення [78–84].

Продуктивний потенціал сортів верби реалізується залежно від поєднання генетичних властивостей і умов середовища. Генотип визначає біологічну здатність рослин до інтенсивного росту, формування пагонів, накопичення сухої речовини, відростання після зрізування та стійкості до несприятливих чинників. Водночас фактична продуктивність енергетичних плантацій значною мірою залежить від ґрунтово – кліматичних умов, зокрема рівня зволоження, родючості ґрунту, температурного режиму, тривалості вегетаційного періоду та забезпеченості рослин елементами живлення [85–88].

У регіонах із достатнім зволоженням і родючими ґрунтами сорти верби прутувидної здатні формувати високі прирости надземної біомаси, оскільки за таких умов рослини краще реалізують потенціал фотосинтетичної активності, інтенсивного пагоноутворення та наростання деревної маси. На таких ділянках вирішальне значення мають сортова продуктивність, тривалість ротації, густина насаджень і рівень агротехнічного забезпечення. Водночас на маргінальних, ущільнених, бідних або посушливих землях продуктивність сортів значною мірою визначається їхньою адаптивністю, здатністю формувати потужну кореневу систему, ефективно використовувати обмежені запаси вологи й підтримувати водний баланс упродовж вегетації [89–92].

Особливо важливою є здатність сортів зберігати стабільність ростових процесів за мінливих погодних умов. У роки з дефіцитом опадів або підвищеними температурами знижується інтенсивність приросту пагонів, обмежується формування листкової поверхні та зменшується накопичення сухої речовини. У таких умовах перевагу мають сорти, які характеризуються кращою посухостійкістю, ефективнішим використанням води, вищою збереженістю рослин і здатністю швидко відновлювати ріст після стресового періоду. Тому адаптивність сорту є не менш важливою ознакою, ніж його потенційна врожайність за оптимальних умов [85, 90–92].

Сучасні дослідження підтверджують, що сорти, які демонструють високу продуктивність в одному регіоні, не завжди зберігають перевагу в інших ґрунтово – кліматичних умовах. Це пояснюється різною реакцією генотипів на рівень зволоження, температуру, родючість ґрунту, фотоперіод, тривалість вегетації, ураження шкідниками та хворобами, а також на особливості технології вирощування. У зв'язку з цим результати сортовипробування, отримані в одній країні або кліматичній зоні, не можуть автоматично переноситися на інші регіони без додаткової експериментальної перевірки [93–96].

Регіональне сортовипробування є необхідною складовою впровадження енергетичних плантацій, оскільки воно дає змогу встановити реальний рівень продуктивності сортів у конкретних умовах вирощування, оцінити їхню збереженість, стійкість до стресових чинників, здатність до відростання після зрізування та стабільність урожайності в різні роки. Крім того, такі дослідження дозволяють уточнити оптимальну густоту садіння, тривалість ротаційного циклу, потребу в удобренні та доцільність використання певних сортів для промислового вирощування [97–100].

Реалізація продуктивного потенціалу верби прутовидної є результатом взаємодії генотипу, умов середовища та технології вирощування. Для створення високопродуктивних і стабільних енергетичних плантацій необхідно добирати сорти не лише за максимальними показниками врожайності, а й за їх адаптивністю, стійкістю до несприятливих чинників, здатністю підтримувати приріст за змінних умов і стабільністю формування сухої біомаси. Саме тому регіональне вивчення сортів **Salix viminalis** L. в умовах Правобережного Лісостепу України є важливою передумовою наукового обґрунтування їх виробничого використання [85–100].

Біометричні показники рослин є надійними критеріями оцінки сортів. Висота пагонів визначає вертикальний розвиток надземної маси, діаметр стебел

тісно пов'язаний із масою деревини, а кількість пагонів на кущ характеризує здатність сорту до кушіння і формування продуктивного габітусу [101–108]. Водночас висока кількість пагонів не завжди забезпечує найвищу продуктивність, якщо окремі пагони мають малий діаметр і низьку масу. Тому сортова оцінка має базуватися на комплексному аналізі всіх структурних елементів урожаю [109–116].

Фотосинтетична активність і розвиток асиміляційного апарату також мають важливе значення для формування біомаси. Площа листкової поверхні, ефективність використання сонячної радіації та функціональний стан фотосистеми II визначають інтенсивність накопичення органічної речовини [117–122]. Сорти, які поєднують добре розвинений листковий апарат із високими біометричними показниками пагонів, зазвичай мають вищий потенціал продуктивності [123–128].

Отже, сортові ресурси верби прутовидної є ключовою основою ефективного виробництва енергетичної біомаси. Для умов Правобережного Лісостепу України особливо важливо оцінювати сорти різного селекційного походження за комплексом ознак: приживлюваністю, ростом, кущистістю, діаметром пагонів, урожайністю сухої біомаси, здатністю до відростання та адаптивністю до місцевих умов [129–136].

1.4. Якісні, енергетичні, екологічні та економічні аспекти використання біомаси верби прутовидної

Перспективність верби прутовидної як енергетичної культури визначається не лише рівнем урожайності надземної біомаси, а й її якісними характеристиками. Для виробництва твердого біопалива важливими є вміст сухої речовини, теплотворна здатність, зольність, співвідношення основних структурних компонентів деревини — целюлози, геміцелюлози та лігніну, а також концентрація мінеральних елементів, здатних впливати на процес

спалювання, утворення золи, шлакування, корозію обладнання та екологічні показники викидів [137–142].

Вміст сухої речовини є одним із базових показників якості біомаси, оскільки саме він визначає фактичний вихід енергетично цінної сировини з одиниці площі. Біомаса з підвищеною вологістю має нижчу ефективність спалювання, потребує більших витрат на транспортування, зберігання та сушіння, а також може створювати проблеми під час тривалого зберігання. Тому для енергетичного використання перевагу мають сорти, здатні формувати високий урожай сухої речовини та забезпечувати стабільні якісні показники біомаси в різні роки вирощування [137, 138].

Теплотворна здатність деревної біомаси залежить від її хімічного складу, насамперед від вмісту лігніну, целюлози та екстрактивних речовин. Лігнін має вищу енергетичну цінність порівняно з полісахаридними компонентами, тому його вміст може позитивно впливати на паливні властивості сировини. Водночас целюлоза та геміцелюлоза визначають придатність біомаси не лише до прямого спалювання, а й до біохімічної переробки, зокрема виробництва рідких біопалив або інших біопродуктів. Отже, співвідношення основних компонентів лігноцелюлозного комплексу є важливим критерієм оцінки напрямів використання біомаси верби [139–141].

Зольність є одним із найважливіших технологічних показників твердого біопалива. Низький вміст золи сприяє підвищенню ефективності спалювання, зменшенню кількості твердих залишків і поліпшенню роботи котельного обладнання. Підвищена зольність, навпаки, може призводити до збільшення кількості відходів, утворення відкладень на поверхнях теплообміну, шлакування та зниження енергетичної ефективності. Крім загального вмісту золи, важливе значення має її мінеральний склад, зокрема концентрація калію, натрію, кальцію, магнію, хлору та сірки [140–142].

Особливу увагу під час оцінювання біомаси верби приділяють вмісту хлору й сірки, оскільки ці елементи можуть негативно впливати на процес спалювання та довговічність обладнання. Підвищений вміст хлору сприяє корозійним процесам, особливо за високих температур, а сірка може бути джерелом небажаних газоподібних викидів. Водночас наявність кальцію, магнію та калію у золі може мати агрохімічне значення, оскільки зольні залишки потенційно можуть бути використані як вторинний ресурс для повернення частини елементів живлення в агроєкосистему [141, 142].

Таким чином, комплексна оцінка якості біомаси верби прутувидної має включати не лише визначення врожайності сухої речовини, а й аналіз її паливних, хімічних і технологічних властивостей. Найбільш перспективними для біоенергетичного використання є сорти, які поєднують високу продуктивність сухої біомаси, достатню теплотворну здатність, низьку зольність, сприятливий мінеральний склад і стабільні показники якості в умовах конкретної зони вирощування [137–142]. Біомаса верби належить до лігноцелюлозної сировини. Основними її компонентами є целюлоза, геміцелюлоза та лігнін. Целюлоза й геміцелюлоза мають значення для біохімічної конверсії, тоді як лігнін підвищує теплотворну здатність і придатність сировини до термічного використання [143–148]. Співвідношення цих компонентів може змінюватися залежно від сорту, віку рослин, умов вирощування та періодичності заготівлі [149–152].

Зольність є важливим технологічним показником твердого біопалива. Низький вміст золи зменшує кількість залишків після спалювання, ризик шлакування та витрати на обслуговування котельного обладнання [1–6]. Водночас зола містить калій, кальцій, магній та інші елементи, які можуть розглядатися як вторинний ресурс для повернення мінеральних елементів у ґрунт. Однак підвищений вміст хлору, сірки, калію або натрію може погіршувати паливні властивості біомаси через корозійні процеси та небажані викиди [7–14].

Теплотворна здатність деревини верби визначає її енергетичну цінність і конкурентоспроможність порівняно з іншими видами твердого біопалива. Висока частка сухої речовини, низька зольність і сприятливий хімічний склад є передумовами ефективного використання біомаси для виробництва теплової енергії [15–22]. Для практичного використання важливе значення має також вологість сировини, оскільки надлишкова волога знижує ефективність спалювання та підвищує витрати на транспортування і сушіння [23–30].

Крім прямого спалювання, біомаса верби може використовуватися для виробництва деревної тріски, пелетів, брикетів, синтез – газу, біовугілля та інших продуктів біоекономіки [31–38]. Перспективним напрямом є комплексна переробка лігноцелюлозної сировини, за якої енергетична функція поєднується з виробництвом матеріалів, сорбентів, біохімічних продуктів або ґрунтових поліпшувачів [39–46].

Екологічні переваги вербових плантацій пов'язані із заміщенням викопного палива, поглинанням вуглецю у процесі фотосинтезу, накопиченням органічної речовини у ґрунті, зменшенням ерозійних процесів і можливістю використання земель, які мають обмежену придатність для продовольчого виробництва [47–54]. Верба також розглядається як культура з фіторемедіаційним потенціалом, здатна використовуватися для очищення забруднених ґрунтів і вод, утилізації органічних відходів і формування буферних смуг [55–62].

Економічна ефективність вирощування верби прутувидної значною мірою залежить від сукупних витрат на створення, догляд, експлуатацію та заготівлю енергетичних плантацій. До основних статей витрат належать підготовка ґрунту, придбання або заготівля садивного матеріалу, садіння живців, догляд за насадженнями в перші роки вирощування, контроль бур'янів, внесення добрив,

захист від шкідників і хвороб, механізоване зрізування, подрібнення, транспортування, зберігання та реалізація біомаси [63–70].

Найбільші капітальні витрати зазвичай припадають на етап створення плантації, оскільки саме в цей період необхідно забезпечити якісну підготовку ґрунту, використання життєздатного садивного матеріалу та формування оптимальної густоти насаджень. Водночас ці витрати мають довгостроковий характер, адже плантація верби прутівидної експлуатується протягом кількох ротаційних циклів. Тому економічна доцільність її вирощування визначається не лише витратами першого року, а й здатністю насаджень стабільно формувати врожай біомаси упродовж усього періоду використання [71–73].

Важливе значення має стабільність урожайності упродовж кількох циклів заготівлі. Якщо після першого або другого зрізування рослини добре відростають і підтримують високий рівень продуктивності, початкові інвестиції розподіляються на більший обсяг отриманої біомаси, що знижує собівартість одиниці продукції. Навпаки, зрідження насаджень, зниження збереженості рослин, погіршення фітосанітарного стану, недостатнє відростання після зрізування або низька урожайність можуть істотно збільшувати питомі витрати й знижувати рентабельність виробництва [74–78].

На економічні показники значно впливає і технологія заготівлі біомаси. Механізоване зрізування й подрібнення дають змогу зменшити витрати праці та забезпечити швидке збирання значних площ, однак потребують спеціалізованої техніки або доступу до відповідних послуг. Вартість заготівлі залежить від площі плантації, урожайності, вологості біомаси, відстані до місця зберігання або споживання, а також від організації логістики. За невеликих площ або значної віддаленості від споживача витрати на заготівлю й транспортування можуть істотно знижувати економічну привабливість виробництва [63, 69, 79].

Оптимальна економічна модель вирощування верби прутovidної передбачає поєднання високої урожайності сухої біомаси, мінімізації виробничих витрат і наявності локального споживача сировини. Найбільш ефективним є розміщення енергетичних плантацій поблизу котелень, теплогенерувальних установок, агропромислових підприємств або громад, які мають стабільну потребу в твердому біопаливі. У такому разі скорочуються логістичні витрати, підвищується конкурентоспроможність біомаси порівняно з викопними енергоносіями та створюються додаткові можливості для розвитку місцевої економіки [79–83].

Важливим чинником економічної ефективності є також вибір сорту та тривалості ротаційного циклу. Високопродуктивні сорти, здатні стабільно відростати після зрізування й формувати високий вихід сухої речовини, забезпечують вищу окупність плантацій. Водночас невдало підібраний строк заготівлі може призводити до зменшення середньорічного приросту, зниження якості біомаси або збільшення втрат під час збирання. Тому економічна оцінка має враховувати не лише абсолютну врожайність за один цикл, а й середньорічну продуктивність, витрати на експлуатацію та тривалість ефективного використання плантації [84–86].

Таким чином, економічна ефективність вирощування верби прутovidної визначається поєднанням біологічних, технологічних, логістичних і ринкових чинників. Найвищу рентабельність можна очікувати за умови використання адаптованих високопродуктивних сортів, оптимальної густоти садіння, науково обґрунтованого строку зрізування, механізованої заготівлі, мінімальних транспортних витрат і стабільного попиту на біомасу. Саме тому під час обґрунтування доцільності створення енергетичних плантацій необхідно проводити комплексну оцінку не лише урожайності, а й собівартості, енергетичної віддачі та можливостей реалізації отриманої сировини [63–

86]. Енергетична ефективність вирощування верби прутovidної визначається співвідношенням між кількістю енергії, накопиченої у сформованій біомасі, та сукупними енергетичними витратами на її виробництво, заготівлю, транспортування, зберігання і підготовку до використання. До таких витрат належать енерговитрати на підготовку ґрунту, заготівлю та висаджування живців, догляд за плантацією, внесення добрив, контроль бур'янів, механізоване зрізування, подрібнення, перевезення та, за потреби, сушіння біомаси. Тому енергетична оцінка є важливою складовою комплексного аналізу доцільності вирощування верби як сировини для твердого біопалива [87–90].

Для короткоротаційних деревних культур цей показник може бути достатньо високим завдяки багаторічному використанню плантації, відсутності потреби у щорічному пересіванні, здатності рослин до інтенсивного відростання після зрізування та можливості механізованої заготівлі біомаси. Після створення плантації основні витрати зосереджуються переважно на догляді, періодичному збиранні та транспортуванні сировини, тоді як продуктивне використання насаджень може тривати протягом кількох ротаційних циклів. Це підвищує енергетичну віддачу культури й робить вербу прутovidну конкурентоспроможною порівняно з окремими однорічними енергетичними культурами [91–94].

Важливим чинником енергетичної ефективності є рівень урожайності сухої біомаси. Чим вищий вихід сухої речовини з одиниці площі, тим більша кількість енергії акумулюється в урожаї та тим нижчими є питомі витрати енергії на виробництво однієї тонни біопалива. Водночас низька врожайність, зрідження насаджень, слабе відростання після зрізування або зниження середньорічного приросту можуть суттєво погіршувати енергетичні показники вирощування, навіть за умови застосування загалом правильної технології [95–97].

Значний вплив на енергетичну ефективність має також тривалість ротаційного циклу. Надто короткий цикл заготівлі може не забезпечити повної реалізації продуктивного потенціалу рослин, оскільки біомаса не встигає накопичитися в достатньому обсязі. Натомість надмірно подовжений цикл може супроводжуватися зниженням середньорічного приросту, старінням пагонів, погіршенням фітосанітарного стану плантації, ламкістю стебел і підвищенням втрат під час збирання. Тому оптимальна періодичність зрізування має забезпечувати максимальний вихід сухої біомаси за мінімальних питомих енергетичних витрат [98–100].

Не менш важливим є логістичний чинник. Ефективність використання біомаси може знижуватися за надмірної віддаленості плантацій від місця споживання або переробки, оскільки транспортування деревної сировини потребує значних витрат пального та організаційних ресурсів. Особливо це стосується біомаси з підвищеною вологістю, коли перевезення фактично включає значну частку води, що не має енергетичної цінності. У зв'язку з цим енергетичні плантації доцільно розмішувати поблизу котелень, теплогенерувальних установок, переробних підприємств або локальних споживачів біопалива [95, 101].

Таким чином, висока енергетична ефективність вирощування верби прутувидної можлива лише за умови поєднання високої урожайності сухої біомаси, оптимального ротаційного циклу, стабільного відростання рослин після зрізування, раціональної системи догляду та мінімізації логістичних витрат. Для практичного впровадження енергетичних плантацій важливо враховувати не лише біологічний потенціал сорту, а й технологічну, економічну та просторову організацію виробництва біомаси [87–102]. Отже, комплексна оцінка верби прутувидної як енергетичної культури має включати продуктивність, якість біомаси, екологічні переваги, економічну доцільність і енергетичну

ефективність. Для умов Правобережного Лісостепу України важливим є добір сортів, які забезпечують високу урожайність сухої речовини, мають сприятливий хімічний склад, низьку зольність, достатню теплотворну здатність і здатність до стабільного відростання після зрізування [103–152].

Висновки до розділу 1. Аналіз літературних джерел свідчить, що біомаса є важливим компонентом відновлюваної енергетики, а верба прутувидна належить до найбільш перспективних деревних культур для виробництва твердого біопалива. Продуктивність енергетичних плантацій верби формується під впливом комплексу чинників, серед яких важливе значення мають сортові особливості, якість садивного матеріалу, густина садіння, схема розміщення рослин, удобрення, система догляду та тривалість ротаційного циклу. Сортові ресурси **Salix viminalis** L. характеризуються значною біологічно – екологічною мінливістю, а сорти різного селекційного походження істотно відрізняються за інтенсивністю росту, кущистістю, діаметром пагонів, здатністю до відростання після зрізування та урожайністю сухої біомаси. Якість біомаси верби визначається вмістом сухої речовини, лігноцелюлозним складом, зольністю, мінеральним складом і теплотворною здатністю; ці показники впливають на придатність біомаси до спалювання, пелетування, брикетування та інших напрямів біоенергетичного використання. Отже, для умов Правобережного Лісостепу України необхідним є комплексне оцінювання сортів верби прутувидної за продуктивністю, якістю біомаси, адаптивністю до місцевих умов і стабільністю відростання після зрізування, що й визначає актуальність проведених дисертаційних досліджень.

РОЗДІЛ 2.

ПРОГРАМА, МЕТОДИКА ТА УМОВИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Місце і умови проведення досліджень

Полеві та лабораторні дослідження проводили на дослідному полі Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України, розташованому в с. Ксаверівка Друга Білоцерківського району Київської області. Територія дослідного поля належить до зони Правобережного Лісостепу України, яка характеризується помірно континентальним кліматом, достатнім рівнем теплозабезпечення та нестійким зволоженням упродовж вегетаційного періоду.

Ґрунтовий покрив дослідного поля представлений чорноземами типовими глибокими малогумусними грубопилувато – середньосуглинковими. Вміст гумусу в орному шарі ґрунту становив 3,05 %. Реакція ґрунтового розчину була близькою до нейтральної. Вміст азоту легкогідролізованого становив 12,77 мг/кг ґрунту, рухомого фосфору за Чириковим — 189,0 мг/кг ґрунту, рухомого калію — 113,0 мг/кг ґрунту. Такі агрохімічні показники свідчать про достатню забезпеченість ґрунту фосфором і калієм та помірне забезпечення азотом, що є важливим для формування продуктивності деревних енергетичних культур.

Кліматичні умови в районі проведення досліджень упродовж 2022–2025 рр. характеризувалися підвищеними температурами повітря порівняно із середніми багаторічними значеннями та нерівномірним розподілом опадів за місяцями. Це мало істотне значення для росту й розвитку верби прутovidної, оскільки культура чутливо реагує на забезпечення вологою, особливо у періоди активного пагоноутворення та інтенсивного приросту надземної біомаси.

Кліматичні умови дослідного поля Ксаверівка Друга впродовж року, що передував дослідженням та безпосередньо років досліджень (2022–2025 рр.)

характеризувалася вищими показниками, порівняно із середніми багаторічними даними (табл. 2.1, 2.2).

Аналіз середньомісячних температур повітря на Дослідному полі ІБКіЦБ упродовж 2022–2025 рр. свідчить про загальну тенденцію до підвищення температурного режиму порівняно із середньобагаторічними значеннями. Середньобагаторічна річна температура повітря для зони проведення досліджень становить 9,5 °С. У 2022 році середньорічна температура відповідала цьому показнику і становила 9,5 °С, тоді як у 2023, 2024 і 2025 роках вона була вищою – відповідно 11,5; 11,2 і 11,6 °С. Отже, найтеплішим за середньорічним показником був 2025 рік, коли перевищення середньобагаторічного значення становило 2,1 °С.

Зимовий період у роки досліджень характеризувався помірними від’ємними або близькими до нуля температурами. У січні середньомісячна температура коливалася від – 2,2 °С у 2024–2025 рр. до – 1,3 °С у 2022 р., що було близьким до середньобагаторічного значення – 2,7 °С. Лютий у 2022, 2024 і 2025 роках був теплішим за норму: температура становила відповідно 1,6; 3,3 і 3,3 °С за середньобагаторічного показника – 0,7 °С. Лише у 2023 році лютий мав від’ємну середньомісячну температуру – 1,0 °С.

Весняний період відзначався помітним підвищенням температури, особливо у квітні та травні. У квітні середньомісячна температура в усі роки досліджень перевищувала середньобагаторічне значення 9,8 °С, за винятком 2022 року, коли вона становила 8,8 °С. Найвищою температура квітня була у 2023 році – 13,0 °С. У травні найвищий температурний показник також спостерігався у 2023 році – 19,7 °С, що на 4,7 °С вище за середньобагаторічне значення. Такі умови сприяли ранньому відновленню вегетації та активізації ростових процесів у рослин верби прутovidної.

Літні місяці характеризувалися стабільно високими температурами. У червні температура змінювалася від 20,8 °С у 2022, 2024 і 2025 роках до 22,5 °С у 2023 році за середньобогаторічного значення 20,2 °С. Найвищі температури упродовж досліджуваного періоду спостерігалися в липні: 24,6 °С у 2023 році, 23,5 °С у 2024 році та 23,4 °С у 2025 році, що перевищувало середньобогаторічний показник 21,1 °С. Серпень також був теплішим за норму в усі роки досліджень, особливо у 2023 році, коли середньомісячна температура становила 23,9 °С.

Осінній період також характеризувався підвищеними температурами. У вересні 2023–2025 рр. середньомісячна температура становила 18,0–19,5 °С, що значно перевищувало середньобогаторічний показник 15,2 °С. Особливо теплими були вересень 2024 і 2025 років, коли температура досягала 19,5 °С. У жовтні температура також була вищою за норму в усі роки досліджень і коливалася від 9,7 °С у 2022 році до 11,5 °С у 2023 році за середньобогаторічного значення 8,7 °С. Листопад 2025 року був істотно теплішим порівняно з іншими роками – 7,3 °С за середньобогаторічного значення 3,1 °С.

У грудні температурний режим був нестійким. У 2022 і 2023 роках середньомісячна температура була від’ємною або близькою до нуля і становила відповідно – 0,3 та – 1,0 °С. У 2024 році грудень був теплішим — 0,5 °С, а у 2025 році температура становила 1,8 °С, що на 1,9 °С вище за середньобогаторічне значення. Це свідчить про тенденцію до пом’якшення температурного режиму зимового періоду.

Загалом температурні умови 2022–2025 рр. були сприятливими для вирощування верби прутovidної, оскільки підвищені температури у весняно – літній період сприяли активному росту пагонів, формуванню листової поверхні та накопиченню надземної біомаси. Водночас високі температури в літні місяці, особливо за недостатнього зволоження, могли посилювати випаровування вологи

з ґрунту та створювати стресові умови для рослин. Таким чином, роки досліджень характеризувалися підвищеним температурним фоном, що дало змогу оцінити ріст і продуктивність сортів верби прутовидної в умовах сучасного потепління клімату Правобережного Лісостепу України.

Таблиця 2.1

Середньомісячні температури (°С) на Дослідному полі ІБКіЦБ за роки проведення досліджень (за даними інтернет – ресурсу gr5.lv)

| Місяць | Роки | | | | Середньо – багаторічні значення |
|----------------|-------|-------|-------|-------|---------------------------------|
| | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | |
| Січень | – 1,3 | – 2,0 | – 2,2 | – 2,2 | – 2,7 |
| Лютий | 1,6 | – 1,0 | 3,3 | 3,3 | – 0,7 |
| Березень | 2,2 | 4,6 | 4,4 | 4,4 | 4,1 |
| Квітень | 8,8 | 13,0 | 12,4 | 12,4 | 9,8 |
| Травень | 14,6 | 19,7 | 15,7 | 15,8 | 15,0 |
| Червень | 20,8 | 22,5 | 20,8 | 20,8 | 20,2 |
| Липень | 20,7 | 24,6 | 23,5 | 23,4 | 21,1 |
| Серпень | 21,8 | 23,9 | 21,8 | 21,8 | 20,8 |
| Вересень | 12,3 | 18,0 | 19,5 | 19,5 | 15,2 |
| Жовтень | 9,7 | 11,5 | 10,7 | 10,6 | 8,7 |
| Листопад | 3,6 | 3,9 | 4,1 | 7,3 | 3,1 |
| Грудень | – 0,3 | – 1,0 | 0,5 | 1,8 | – 0,1 |
| Середня за рік | 9,5 | 11,5 | 11,2 | 11,6 | 9,5 |

Аналіз суми опадів за місяцями на Дослідному полі ІБКіЦБ упродовж 2022–2025 рр. свідчить про значну мінливість вологозабезпечення порівняно із середньобагаторічними показниками. Середньобагаторічна річна сума опадів для зони проведення досліджень становить 618 мм. У 2022 році випало 560 мм опадів, що на 58 мм менше від норми. У 2023 році кількість опадів становила 621 мм, тобто практично відповідала середньобагаторічному рівню. У 2024 році річна сума опадів становила 526,8 мм, що на 91,2 мм менше від середньобагаторічного

показника. Найменш зволожений був 2025 рік, коли за рік випало 465 мм опадів, тобто на 153 мм менше порівняно із середньобагаторічним значенням.

У зимовий період кількість опадів істотно змінювалася за роками. У січні найбільше опадів випало у 2022 році, 50 мм, що перевищувало середньобагаторічне значення 37 мм. У 2025 році січень був значно сухішим, кількість опадів становила лише 13,8 мм. У лютому найменша кількість опадів також була у 2025 році, 3,3 мм, тоді як у 2023 році вона відповідала середньобагаторічному показнику і становила 39 мм. У грудні кількість опадів у 2022 році становила 58 мм, у 2023 році 45 мм, у 2024 році 43,4 мм, а у 2025 році 42,4 мм за середньобагаторічного значення 47 мм.

Весняний період характеризувався нерівномірним зволоженням. У березні 2024 року випало 69,3 мм опадів, що значно перевищувало середньобагаторічне значення 40 мм. Водночас у 2022 році березень був сухим, кількість опадів становила лише 12 мм. У квітні найбільше опадів спостерігалось у 2024 році, 69,4 мм, що на 27,4 мм більше від норми. У травні найбільш зволожений був 2025 рік, 84,9 мм, тоді як у 2024 році випало лише 7,1 мм, що свідчить про гострий дефіцит вологи на початку активної вегетації рослин.

У літні місяці розподіл опадів також був контрастним. У червні найбільша кількість опадів була у 2023 році, 82 мм, та у 2024 році, 76,3 мм, що було близьким або вищим за середньобагаторічне значення 74 мм. У 2025 році червень був сухішим, випало 34 мм опадів. Найбільші відмінності спостерігалися у липні. У 2025 році випало 129,7 мм опадів, що майже вдвічі перевищувало середньобагаторічний показник 68 мм. Натомість у 2024 році липень був дуже посушливим, кількість опадів становила лише 10 мм. У серпні кількість опадів у 2022 і 2023 роках становила по 60 мм, що було близьким до норми, тоді як у 2024 та 2025 роках вона зменшилася до 33,3 і 25,9 мм відповідно.

Осінній період у роки досліджень відзначався значною різницею за кількістю опадів. У вересні 2022 та 2023 років випало відповідно 63 і 57 мм, що було близьким до середньобагаторічного значення 58 мм. У 2024 році кількість опадів знизилася до 12,8 мм, а у 2025 році становила 23,9 мм, що свідчить про дефіцит вологи на завершальному етапі вегетації. У жовтні найбільше опадів було у 2024 році, 62,4 мм, тоді як у 2025 році випало 31,8 мм. У листопаді найвищу кількість опадів зафіксовано у 2022 році, 99 мм, а найнижчу у 2025 році, 21,4 мм.

Загалом найсприятливішим за річною сумою опадів був 2023 рік, коли кількість вологи практично відповідала середньобагаторічній нормі. У 2022 році відмічено помірний дефіцит опадів, у 2024 році дефіцит був більш вираженим, а у 2025 році він був найбільшим за весь період досліджень. Особливо несприятливими для росту й розвитку верби прутovidної були періоди з низькою кількістю опадів у травні, липні та вересні 2024 року, а також у червні, серпні, вересні, жовтні й листопаді 2025 року.

Отже, умови зволоження у роки проведення досліджень були нестабільними і характеризувалися значною міжрічною та помісячною мінливістю. Такий розподіл опадів мав важливе значення для оцінки адаптивності досліджуваних сортів верби прутovidної, оскільки нестача вологи в окремі періоди вегетації могла обмежувати інтенсивність росту пагонів, формування листової поверхні та накопичення надземної біомаси.

Таблиця 2.2

Сума опадів за місяцями на Дослідному полі ІБКіЦБ протягом років проведення досліджень, мм (за даними інтернет – ресурсу pr5.lv)

| Місяць | Роки | | | | Середньо – багаторічні значення |
|--------|------|------|------|------|---------------------------------|
| | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | |
| Січень | 50 | 36 | 39,1 | 13,8 | 37 |
| Лютий | 17 | 39 | 36,1 | 3,3 | 39 |

| | | | | | |
|---------------|------------|------------|--------------|------------|------------|
| Березень | 12 | 37 | 69,3 | 25,9 | 40 |
| Квітень | 42 | 46 | 69,4 | 28,0 | 42 |
| Травень | 33 | 57 | 7,1 | 84,9 | 65 |
| Червень | 42 | 82 | 76,3 | 34,0 | 74 |
| Липень | 40 | 71 | 10,0 | 129,7 | 68 |
| Серпень | 60 | 60 | 33,3 | 25,9 | 56 |
| Вересень | 63 | 57 | 12,8 | 23,9 | 58 |
| Жовтень | 44 | 41 | 62,4 | 31,8 | 46 |
| Листопад | 99 | 50 | 67,6 | 21,4 | 46 |
| Грудень | 58 | 45 | 43,4 | 42,4 | 47 |
| За рік | 560 | 621 | 526,8 | 465 | 618 |

Аналіз гідротермічного коефіцієнта показав, що умови зволоження у роки досліджень були нерівномірними. У 2022 і 2023 роках ГТК за вегетаційний період становив 1,0, що було нижче за середньобаторічний показник 1,3. Найбільш посушливим був 2024 рік, коли ГТК за вегетацію становив лише 0,6. Особливо дефіцитними за зволоженням були травень, липень і вересень 2024 року, де значення ГТК становили відповідно 0,1; 0,1 і 0,2 (табл. 2.3.)

Таблиця 2.3

**Показники гідротермічного коефіцієнта (ГТК) протягом
вегетаційного періоду в роки проведення досліджень**

| Роки | Місяці | | | | | | За веге – тацію | За рік |
|---------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------------------|-------------|
| | квітень | травень | червень | липень | серпень | вересень | | |
| 2022 | 1,6 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,9 | 1,7 | 1,0 | 1,1 |
| 2023 | 1,3 | 2,3 | 0,6 | 0,6 | 0,9 | 0,4 | 1,0 | 1,2 |
| 2024 | 1,9 | 0,1 | 1,2 | 0,1 | 0,5 | 0,2 | 0,6 | 1,0 |
| 2025 | 0,8 | 1,7 | 0,5 | 1,8 | 0,4 | 0,4 | 0,9 | 1,1 |
| Середні | 1,45 | 1,5 | 0,65 | 0,6 | 0,9 | 1,05 | 1,0 | 1,15 |
| СБР | 1,4 | 1,1 | 1,5 | 1,4 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,5 |

У 2025 році умови були більш контрастними: травень і липень характеризувалися достатнім або надмірним зволоженням, тоді як червень,

серпень і вересень – дефіцитом вологи. У середньому за роки досліджень ГТК за вегетаційний період становив 0,9, що свідчить про переважання умов недостатнього зволоження у період росту й формування біомаси верби прутовидної.

2.2. Коротка характеристика досліджуваних культиварів верби прутовидної

У досліджах було використано 6 культиварів верби прутовидної (*Salix viminalis* L.): 'Тордіс', 'Інгер', 'Вільгельм', '1047' ('Gigantea'), '1057' ('Marzencinski') та '082' ('Warm – maz').

'Тордіс' ('Tordis') – гібрид сорту 'Тора' із сортом верби прутовидної 'Ульв' ('Ulv'). Один з найбільш високопродуктивних сортів. Успішно росте на всіх ґрунтах, особливо – на сухих. Дуже високоурожайний в північно – центральній Європі. Не пошкоджується іржею листя.

'Інгер' ('Inger') – гібрид верби тритичинкової (*S. triandra* L., жіночий клон SW911066) із клоном верби прутовидної 'Йор' ('Jorr'). Як і 'Тордіс', є одним з найбільш високопродуктивних сортів. Успішно росте на всіх ґрунтах, особливо – на сухих. Найвищі врожаї біомаси формує в умовах м'якого теплого клімату з нормальним забезпеченням вологою.

'Вільгельм' ('Wilhelm') – гібрид сортів 'Шервуд' і 'Бйорн', створених на основі верби прутовидної [**Error! Reference source not found., Error! Reference source not found., Error! Reference source not found.**].

Сорти польської селекції '1047' ('Gigantea'), '1057' ('Marzencinski') і '082' ('Warm – maz') виведені на основі верби прутовидної:

'1047' ('Gigantea'). Сорт польської селекції, створений на основі верби прутовидної (*Salix viminalis* L.). Характеризується інтенсивним ростом, формуванням високорослих кущів і довгих прямостоячих пагонів, що робить його перспективним для створення енергетичних плантацій. У трирічному циклі вирощування на вилугуваних чорноземах Правобережного Лісостепу України сорт '1047' відзначався значною висотою рослин – близько 470 см, а середня довжина пагонів становила близько 365 см. За даними досліджень, цей сорт забезпечив один із найвищих показників урожайності сухої надземної біомаси –

27,81 т/га, що свідчить про його високу продуктивність і доцільність використання для отримання енергетичної сировини. Водночас у старших насадженнях без періодичного зрізування приріст може знижуватися, тому для сорту доцільним є вирощування з регулярним збиранням біомаси у короткоротаційних циклах.

'1057' ('Marzencinski'). Сорт польського походження, виведений на генетичній основі верби прутovidної. Відзначається доброю адаптивністю до умов вирощування, інтенсивним пагоноутворенням і здатністю формувати достатньо потужну надземну масу. У дослідженнях енергетичних плантацій верби цей сорт характеризувався порівняно високими біометричними показниками: у восьмирічних насадженнях діаметр пагонів становив до 2,55 см, а маса сухого пагона – близько 1,05 кг. Це свідчить про здатність сорту формувати міцні, добре розвинені пагони з високим потенціалом накопичення деревної біомаси. За комплексом ознак '1057' ('Marzencinski') можна розглядати як перспективний сорт для вирощування в умовах Лісостепу України, особливо за умови дотримання оптимальної періодичності зрізування надземної маси.

'082' ('Warm – maz'). Сорт польської селекції, створений на основі *Salix viminalis* L., який належить до сортів енергетичного напрямку використання. Порівняно з сортами '1047' і '1057' характеризується дещо стриманішим ростом і меншими діаметрами пагонів. У дослідженнях трирічних насаджень найменший середній діаметр біля основи пагона був саме у клону '082' – близько 15,4 мм, а діаметр у середній частині пагона також був найменшим – близько 10,2 мм. У восьмирічному віці висота рослин сорту 'Warm – maz' становила близько 5,90 м, проте для нього відмічено більш раннє зниження інтенсивності приросту порівняно з окремими іншими сортами. Тому цей сорт може використовуватися в енергетичних насадженнях, але його продуктивність значною мірою залежить від умов вирощування та своєчасного зрізування біомаси [153 – 159].

2.3. Методика проведення досліджень

Дослідження проводили за загальноприйнятими та спеціальними агрономічними методами польових і лабораторних досліджень із використанням математично – статистичних методів для опрацювання та аналізу експериментальних даних. Під час виконання роботи застосовували польовий, лабораторний, вимірювально – ваговий, розрахунково – порівняльний і статистичний методи досліджень.

Дослідні насадження сортів верби прутовидної (**Salix viminalis* L.*) були створені на дослідному полі Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України навесні 2015 року. Живці висаджували спареними рядами. Відстань між рядками у стрічці становила 0,75 м, ширина міжряддя між стрічками – 1,50 м, відстань між живцями в рядку — 0,75 м. За такої схеми садіння густина насаджень становила 15,0 тис. рослин на 1 га.

У дослідженнях вивчали шість культиварів верби прутовидної іноземної селекції: ‘Tordis’, ‘Inger’, ‘Wilhelm’, ‘082’ (‘Warm – maz’), ‘1047’ (‘Gigantea’) та ‘1057’ (‘Marzencinski’).

Дослід 1. Вплив сортових особливостей і циклічності заготівлі енергетичної біомаси на продуктивність енергетичних плантацій верби прутовидної.

Схема досліду передбачала вивчення двох факторів.

Фактор А – сортові особливості:

A1 – ‘Tordis’;

A2 – ‘Inger’;

A3 – ‘Wilhelm’;

A4 – ‘082’ (‘Warm – maz’);

A5 – ‘1047’ (‘Gigantea’);

A6 – ‘1057’ (‘Marzencinski’).

Фактор Б — цикл заготівлі біомаси, років:

B1 – 1 рік;

B2 – 3 роки.

Площа посадкової ділянки становила 30 м², облікової – 27 м². Повторність досліду – триразова. Розміщення ділянок – рендомізоване. Дослід проводили на дослідному полі ІБКіЦБ НААН України в с. Ксаверівка Друга Київської області. Загальна площа досліду становила 0,11 га.

Дослідження росту й розвитку насаджень проводили впродовж трьох років. Після завершення відповідного циклу навесні 2021 року надземну частину рослин зрізували, визначали продуктивність енергетичної біомаси та основні морфометричні показники рослин. Після зрізування відповідно до варіантів досліду вносили аміачну селітру.

Дослід 2. Особливості росту і продуктивності шести – восьмирічних плантацій іноземних сортів верби прутовидної, які зростали без зрізування надземної частини і без удобрення.

Схема досліду передбачала вивчення двох факторів.

Фактор А – сорт верби:

A1 – ‘Marzencinski’;

A2 – ‘Gigantea’;

A3 – ‘Warm – maz’;

A4 – ‘Wilhelm’;

A5 – ‘Inger’;

A6 – ‘Tordis’.

Фактор Б — вік насаджень, років:

B1 – 6 років;

B2 – 7 років;

B3 – 8 років.

Схема садіння становила $0,75 \times 1,50 \times 0,75$ м, густина насаджень – 15,0 тис. рослин на 1 га. Площа посадкової ділянки становила 50 м², облікової – 27 м². Повторність досліду – триразова. Розміщення ділянок – рендомізоване. Дослід проводили на дослідному полі ІБКіЦБ НААН України в с. Ксаверівка Друга Київської області. Загальна площа досліду становила 0,11 га.

Упродовж вегетаційного періоду проводили фенологічні спостереження та біометричні обліки рослин. Основну увагу приділяли визначенню кущистості, висоти рослин, довжини пагонів, діаметра пагонів, маси пагонів, площі листової поверхні та показників фотосинтетичної продуктивності.

Кущистість рослин визначали шляхом підрахунку кількості пагонів не менше ніж у 20 рослин на кожній обліковій ділянці. За показник кущистості приймали середнє арифметичне значення кількості пагонів на одну рослину. Розрахунки проводили з точністю до 0,1 шт. Кущистість використовували для визначення кількості пагонів на 1 га, яку розраховували як добуток середньої кількості пагонів на одну рослину та густоти насаджень. Показник виражали у тис. шт./га.

Висоту рослин визначали як відстань від поверхні ґрунту до найвищої точки рослини. Оскільки рослини верби на енергетичних плантаціях формують декілька пагонів, висоту рослини прирівнювали до довжини головного, тобто найвищого, пагона. На кожній обліковій ділянці проводили не менше 20 вимірювань із точністю до 1 см. За кінцевий результат приймали середнє

арифметичне значення усіх вимірювань, виражене у сантиметрах. Вимірювання висоти рослин здійснювали одночасно з підрахунком кількості пагонів кожні два тижні за допомогою лінійки – висотоміра.

Довжину пагонів визначали на модельних рослинах, які були середніми за кущистістю і висотою для відповідного варіанта досліду. Для цього на кожній обліковій ділянці відбирали таку кількість рослин, щоб сумарно було обліковано не менше 30 пагонів. Довжину пагона вимірювали від його основи до верхівкової бруньки з урахуванням природної кривизни. На кожній обліковій ділянці здійснювали не менше 30 вимірювань із точністю до 1 см. За кінцевий результат приймали середнє арифметичне значення, виражене у сантиметрах.

Діаметр пагонів визначали біля основи, у середній частині пагона або на висоті 1,3 м залежно від віку насаджень і завдань конкретного обліку. Вимірювання проводили на модельних пагонах із використанням штангенциркуля або мірної вилки. На кожній обліковій ділянці обліковували не менше 30 пагонів. Результати виражали у міліметрах або сантиметрах залежно від прийнятої форми подання даних.

Масу пагонів визначали у польових умовах одразу після їх зрізування та очищення від бічних гілок. Зважування проводили на сертифікованих вагах із точністю до 1 г. На кожній обліковій ділянці зважували не менше 30 пагонів. За результатами зважування визначали середню масу одного пагона, сиру масу одного куща та урожайність сирової біомаси з одиниці площі.

Урожайність сирової біомаси визначали розрахунковим методом з урахуванням середньої маси одного куща, густоти насаджень і збереженості рослин. Урожайність сухої біомаси визначали за вмістом сухої речовини в рослинному матеріалі. Середній річний приріст сухої біомаси розраховували шляхом ділення урожайності сухої біомаси на тривалість відповідного циклу вирощування.

Площу листової поверхні визначали за загальноприйнятими методиками шляхом обліку листового апарату модельних рослин. Показник використовували для оцінки розвитку асиміляційного апарату сортів верби прутівидної та їх здатності до формування продуктивної біомаси.

Чисту продуктивність фотосинтезу визначали розрахунковим методом на основі приросту сухої речовини та площі листової поверхні за відповідний період. Цей показник використовували для характеристики ефективності роботи асиміляційного апарату досліджуваних сортів.

Для встановлення взаємозв'язків між основними біометричними показниками рослин проводили кореляційний і регресійний аналіз. Оцінювали залежність маси пагона від його довжини, діаметра біля основи та діаметра в середній частині. Це дало змогу визначити найбільш інформативні показники для прогнозування продуктивності надземної біомаси.

Статистичний аналіз результатів досліджень проводили на персональному комп'ютері з використанням програм Microsoft Office Excel та Statistica 6.0. Для оцінювання достовірності різниць між варіантами застосовували дисперсійний аналіз. Істотність відмінностей між середніми значеннями визначали за найменшою істотною різницею на рівні значущості 0,05. Результати досліджень узагальнювали у вигляді таблиць, графіків і діаграм [160-172].

РОЗДІЛ 3

ОЦІНКА ДОСЛІДЖУВАНИХ СОРТІВ *SALIX VIMINALIS* L. ЗА МОРФОЛОГІЧНИМИ ОЗНАКАМИ АСИМЛЯЦІЙНОГО АПАРАТУ ТА ХІМІЧНИМ СКЛАДОМ БІОМАСИ

У сучасних умовах посилення енергетичних, екологічних і кліматичних викликів особливої актуальності набуває пошук відновлюваних джерел енергії, здатних частково замінити викопні енергоносії та зменшити антропогенне навантаження на довкілля. Одним із перспективних напрямів є використання біомаси багаторічних енергетичних культур, зокрема швидкорослих деревних рослин, які здатні формувати значні обсяги лігноцелюлозної сировини за короткий період вирощування [173, 174].

Серед енергетичних культур важливе місце займає верба прутовидна (*Salix viminalis* L.), яка широко використовується у країнах Європи як сировина для виробництва твердого біопалива. Її перевагами є інтенсивний ріст, здатність до багаторазового відростання після зрізування, придатність до короткоротаційного вирощування, висока адаптивність до різних ґрунтово-кліматичних умов і можливість використання на малопродуктивних або маргінальних землях [174, 175].

Польські дослідники значну увагу приділяли вивченню продуктивності верби у короткоротаційних насадженнях. Зокрема, S. Szczukowski, M. Stolarski, J. Tworkowski, J. Przyborowski та A. Klasa встановили, що продуктивність верби істотно залежить від генотипу, тривалості ротації, густоти насаджень і умов місця вирощування [174]. За їхніми даними, для окремих генотипів *Salix viminalis*, зокрема *S. viminalis* var. *gigantea*, урожайність сухої речовини зростала зі збільшенням періоду заготівлі біомаси від одного до чотирьох років [174]. Це підтверджує важливість добору сортів відповідно до конкретної технології вирощування та строків збирання.

У дослідженнях М. J. Stolarski, S. Szczukowski, J. Tworkowski та А. Klasa підкреслено, що продуктивність клонів верби у короткоротаційних циклах визначається не лише біологічними особливостями сорту, а й частотою зрізування, схемою садіння та агротехнічними умовами [175]. Автори зазначають, що морфологічні ознаки рослин, зокрема висота пагонів, діаметр стебел і кількість пагонів на рослині, є важливими структурними елементами формування врожаю біомаси [175].

Особливий інтерес становлять сорти польської селекції, серед яких у науковій літературі згадуються старі польські форми верби прутovidної, зокрема 'Gigantea', а також новіші селекційні або відібрані форми, придатні для енергетичного використання [176]. За даними S. Jeżowski, K. Głowacka, Z. Kaczmarek і S. Szczukowski, у польських колекціях *Salix viminalis* досліджувалися як старі польські форми, так і нові клони, що відрізнялися за ознаками структури врожаю, інтенсивністю росту та здатністю до формування біомаси [176].

У працях польських авторів також зазначено, що короткоротаційні плантації верби можуть бути ефективним джерелом енергетичної сировини, однак економічна та енергетична доцільність їх вирощування залежить від продуктивності сортів, умов вирощування, густоти насаджень і тривалості циклу заготівлі [177, 178]. Тому вивчення сортових особливостей верби прутovidної в умовах України є необхідним етапом адаптації європейського селекційного матеріалу до місцевих ґрунтово-кліматичних умов.

В умовах Правобережного Лісостепу України актуальним є добір сортів *Salix viminalis* L., які поєднують високу продуктивність біомаси, ефективний розвиток асиміляційного апарату, добрий фізіологічний стан фотосинтетичної системи та сприятливий хімічний склад деревної сировини. Оскільки формування біомаси безпосередньо пов'язане з функціонуванням листкового

апарату, оцінювання морфометричних і фізіологічних параметрів листків дає змогу глибше охарактеризувати продуктивний потенціал сортів.

3.1. Морфологічні ознаки асиміляційного апарату сортів *Salix viminalis* L.

Результати досліджень показали, що сорти верби прутовидної істотно відрізнялися за морфометричними показниками листкового апарату. Це підтверджує наявність значної сортової мінливості, яка може бути використана для добору культиварів із підвищеним продуктивним потенціалом.

Найбільшу масу повітряно-сухого листка мав сорт 'Inger' – 0,212 г. Високі значення цього показника також відмічено у сорту '1057' ('Marzencinski') – 0,206 г та 'Tordis' – 0,200 г. Сорт '1047' ('Gigantea') мав масу листка 0,193 г. Найменше значення встановлено у сорту '082' ('Warm-maz') – 0,144 г. За величини $HP_{0,05} = 0,018$ г різниця між сортами з найвищими показниками та сортом 'Warm-maz' була істотною.

За загальною довжиною листка найбільше значення мав сорт '1057' ('Marzencinski') – 199,3 мм. Це свідчить про добре розвинений асиміляційний апарат і потенційно високу фотосинтетичну активність цього сорту. Дещо менші показники зафіксовано у сортів 'Tordis' – 187,1 мм, 'Wilhelm' – 184,0 мм і '1047' ('Gigantea') – 180,6 мм. Найменші значення довжини листка мали '082' ('Warm-maz') – 171,8 мм та 'Inger' – 170,1 мм.

Аналогічна закономірність простежувалася за довжиною листкової пластинки. Максимальне значення було характерне для сорту '1057' ('Marzencinski') – 185,7 мм. Високими показниками також відзначалися 'Tordis' – 177,6 мм, 'Wilhelm' – 173,8 мм і '1047' ('Gigantea') – 169,8 мм. Найменшу довжину листкової пластинки мали '082' ('Warm-maz') – 162,2 мм і 'Inger' – 161,3 мм.

Довжина черешка коливалася від 8,8 до 13,7 мм. Найбільше значення цього показника встановлено у сорту ‘1057’ (‘Marzencinski’) – 13,7 мм, тоді як найменше – у сорту ‘Inger’ – 8,8 мм. Більша довжина черешка може забезпечувати кращу просторову орієнтацію листків у кроні та сприяти ефективнішому використанню світлового потоку.

За шириною листкової пластинки найбільші значення мали сорти ‘Inger’ – 18,0 мм і ‘Tordis’ – 17,5 мм. Сорт ‘Wilhelm’ характеризувався шириною листкової пластинки 16,8 мм, ‘1057’ (‘Marzencinski’)–15,9 мм, ‘082’ (‘Warm-maz’)–15,0 мм, а найменше значення було у сорту ‘1047’ (‘Gigantea’) –14,4 мм. Це свідчить, що сорти ‘Marzencinski’ і ‘Gigantea’ формували більш видовжені листки, тоді як ‘Inger’ мав ширшу і компактнішу листкову пластинку.

Індекс форми листкової пластинки варіював у межах 9,0–11,8. Найбільше значення мав сорт ‘1047’ (‘Gigantea’) –11,8, що свідчить про виражену видовженість листкової пластинки. Близьким до нього був сорт ‘1057’ (‘Marzencinski’)–11,7. Сорт ‘082’ (‘Warm-maz’) мав індекс 10,8, ‘Tordis’–10,1, ‘Wilhelm’–9,3, а найменше значення було характерне для ‘Inger’–9,0.

Відношення довжини листка до ширини також підтвердило істотну сортову мінливість. Найвище значення встановлено у сорту ‘1057’ (‘Marzencinski’)–27,81, а також у сорту ‘1047’ (‘Gigantea’)–26,06. Сорт ‘Tordis’ мав значення 23,77, ‘082’ (‘Warm-maz’)–21,24, ‘Wilhelm’–15,44, а найнижчий показник зафіксовано у ‘Inger’–13,61. Отже, найбільш видовжені листки були характерні для сортів польської селекції ‘Marzencinski’ і ‘Gigantea’.

Таким чином, морфометричні показники листків свідчать про перевагу сорту ‘1057’ (‘Marzencinski’) за загальним розвитком асиміляційного апарату. Водночас сорт ‘1047’ (‘Gigantea’) характеризувався найбільш видовженою формою листків, а ‘082’ (‘Warm-maz’) мав дещо менші лінійні параметри, але зберігав достатній рівень розвитку листкового апарату (табл. 3.1.).

Таблиця 3.1.

Основні морфометричні та фізіологічні показники фотосинтезуючого апарату досліджуваних сортів верби прутovidної

| Культивари верби | Маса повітряно-сухого листка, г | Довжина листка, мм | | | Ширина листкової пластинки, мм | Відстань від основи пластинки до її най-більшої ширини, мм | Індекс форми листкової пластинки | Відношення довжини листка до ширини | Флоратест Fv/Fm | Частка використання сонячної інсоляції, % |
|----------------------------|---------------------------------|--------------------|-----------|---------|--------------------------------|--|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------|---|
| | | загальна | пластинки | черешка | | | | | | |
| ‘1057’ (‘Marzencinski’) | 0,206 | 199,3 | 185,7 | 13,7 | 15,9 | 61,2 | 0,762 | 11,7 | 27,81 | 60,0 |
| ‘1047’ (‘Gigantea’) | 0,193 | 180,6 | 169,8 | 10,9 | 14,4 | 51,0 | 0,744 | 11,8 | 26,06 | 54,5 |
| ‘082’ (‘Warm-maz’) | 0,144 | 171,8 | 162,2 | 9,6 | 15,0 | 45,5 | 0,727 | 10,8 | 21,24 | 58,0 |
| ‘Inger’ | 0,212 | 170,1 | 161,3 | 8,8 | 18,0 | 50,4 | 0,716 | 9,0 | 13,61 | 46,5 |
| ‘Tordis’ | 0,200 | 187,1 | 177,6 | 9,6 | 17,5 | 46,5 | 0,753 | 10,1 | 23,77 | 57,0 |
| ‘Wilhelm’ | 0,169 | 184,0 | 173,8 | 10,2 | 16,8 | 60,3 | 0,722 | 9,3 | 15,44 | 52,0 |
| HIP _{0,05} | 0,018 | 9,8 | 9,2 | 1,8 | 1,6 | 5,5 | 0,020 | 0,9 | 0,025 | 4,5 |

Фізіологічний стан асиміляційного апарату є важливим критерієм оцінки продуктивного потенціалу енергетичних культур. Показник Fv/Fm характеризує потенційну ефективність фотосистеми II і широко використовується для оцінювання функціонального стану фотосинтетичного апарату рослин.

У досліджуваних сортів значення Fv/Fm коливалися від 0,716 до 0,762. Найвищий показник зафіксовано у сорту ‘1057’ (‘Marzencinski’) –0,762. Високий рівень також мав сорт ‘Tordis’ –0,753. Сорт ‘1047’ (‘Gigantea’) характеризувався значенням 0,744, ‘082’ (‘Warm-maz’) –0,727, ‘Wilhelm’ –0,722, а найнижчий показник був у сорту ‘Inger’ –0,716.

Отримані дані свідчать, що фотосинтетичний апарат усіх досліджуваних сортів перебував у функціонально активному стані. Водночас найкращий фізіологічний стан фотосистеми II був характерний для сорту ‘1057’

(‘Marzencinski’), що узгоджується з його високими морфометричними показниками листкового апарату та найвищою продуктивністю біомаси.

Частка використання сонячної інсоляції змінювалася від 46,5 до 60,0 %. Максимальне значення встановлено у сорту ‘1057’ (‘Marzencinski’) –60,0 %. Високими показниками також характеризувалися сорти ‘082’ (‘Warm-maz’) –58,0 %, ‘Tordis’ –57,0 % та ‘1047’ (‘Gigantea’) –54,5 %. Сорт ‘Wilhelm’ використовував 52,0 % сонячної інсоляції, а найнижче значення мав ‘Inger’ –46,5 %.

Отже, сорти ‘Marzencinski’, ‘Warm-maz’, ‘Tordis’ і ‘Gigantea’ ефективніше використовували сонячну енергію, що може бути важливою передумовою формування високої продуктивності біомаси. Особливої уваги заслуговує сорт ‘Marzencinski’, який поєднував найбільші розміри листків, найвищий показник F_v/F_m і максимальну частку використання сонячної інсоляції.

3.2. Кластерна оцінка сортів за морфофізіологічними ознаками

Порівняльна оцінка сортів і клонів енергетичних культур лише за окремими морфологічними, фізіологічними або продуктивними показниками не завжди дає змогу повною мірою встановити їхню біологічну подібність, адаптивний потенціал і господарську цінність. У зв’язку з цим у сучасних біологічних, селекційних та агрономічних дослідженнях широко застосовують багатовимірні статистичні методи, зокрема кластерний аналіз, який дає змогу групувати досліджувані генотипи за сукупністю кількісних ознак [179, 180].

Кластерний аналіз є ефективним інструментом для виявлення внутрішньовидової мінливості, визначення ступеня подібності між сортами та виділення груп генотипів із близькими морфологічними, фізіологічними або продуктивними характеристиками. Його використання особливо доцільне у випадках, коли досліджувані об’єкти характеризуються комплексом взаємопов’язаних ознак, кожна з яких окремо не може повністю відобразити їхню загальну біологічну специфіку [179, 181].

Метод ієрархічного групування, запропонований J. H. Ward, передбачає формування груп об'єктів за принципом максимальної внутрішньогрупової подібності та мінімізації відмінностей усередині кластерів [180]. У сучасній статистичній практиці ієрархічна кластеризація, зокрема з використанням евклідової відстані, належить до поширених підходів для групування біологічних об'єктів за кількісними ознаками [181].

У рослинництві та селекції кластерний аналіз застосовують для групування сортів, ліній, клонів і гібридів за морфометричними, біохімічними, фізіологічними та продуктивними показниками. Такий підхід дає змогу не лише встановити подібність між досліджуваними формами, а й виділити найбільш віддалені генотипи, які можуть становити цінність для подальшої селекційної роботи або практичного використання [182, 183].

Для деревних енергетичних культур, зокрема представників роду *Salix* L., багатовимірне групування має важливе значення, оскільки продуктивність біомаси формується під впливом комплексу ознак: інтенсивності росту, кількості й діаметра пагонів, розвитку листкового апарату, фотосинтетичної активності та ефективності використання сонячної радіації [184, 185]. Дослідження морфологічної мінливості клонів верби показали, що біометричні ознаки мають істотний зв'язок із накопиченням біомаси, тому їх комплексне оцінювання є доцільним для добору продуктивних генотипів [184].

У роботах, присвячених короткоротаційним насадженням верби, доведено, що сорти й клони *Salix viminalis* L. істотно відрізняються за врожайністю, біометричними характеристиками та здатністю до накопичення сухої речовини [174, 175]. Зокрема, польські дослідники встановили, що продуктивність верби значною мірою залежить від генотипу, тривалості циклу заготівлі біомаси, умов вирощування та агротехнічних чинників [174, 175]. Це підтверджує необхідність

застосування методів, які дають змогу оцінювати сорти не за однією ознакою, а за їх комплексом.

Кластерний аналіз також використовується для оцінювання сортів верби за врожайністю та біометричними параметрами. Зокрема, М. Matyka і Р. Radzikowski, досліджуючи 11 сортів верби, вирощених на маргінальному ґрунті у трирічному циклі, показали, що сорти істотно різняться за продуктивністю та біометричними характеристиками, а багатомірне групування дає змогу виділити групи сортів із подібним рівнем розвитку й продуктивності [185].

Таким чином, застосування кластерного аналізу для оцінки сортів *Salix viminalis* L. за морфофізіологічними ознаками є науково обґрунтованим, оскільки дає змогу комплексно охарактеризувати сортову мінливість, визначити спорідненість або віддаленість культиварів і встановити найбільш перспективні генотипи для створення енергетичних плантацій. У цьому дослідженні кластеризацію сортів проведено за сукупністю кількісних характеристик асиміляційного апарату та показників фотосинтетичної активності, що дозволило виявити групи сортів із подібними морфофізіологічними властивостями та виділити культивари з найвищим продуктивним потенціалом.

Для комплексної оцінки подібності досліджуваних сортів за морфологічними та фізіологічними показниками було проведено кластерний аналіз. Його результати підтвердили наявність значної варіабельності між сортами й дали змогу виділити окремі групи культиварів за сукупністю досліджуваних ознак.

На першому етапі кластеризації, за евклідової відстані близько 4,5, об'єдналися сорти 'Wilhelm' та 'Inger', що свідчить про їхню найбільшу подібність серед усіх досліджуваних варіантів. Далі до цієї групи, на евклідовій відстані близько 11, приєднався сорт '082' ('Warm-maz'). Таким чином, сформувався кластер, до якого увійшли 'Wilhelm', 'Inger' і 'Warm-maz'.

Окремий кластер утворили сорти 'Tordis' і '1047' ('Gigantea'), які об'єдналися на евклідовій відстані близько 13. Це вказує на їхню помірну подібність за морфофізіологічними ознаками. Сорт '1057' ('Marzencinski') приєднався до цієї групи на значно більшій відстані, близько 22, що свідчить про його істотну відмінність від інших сортів.

На найвищому рівні дендрограми сформувалися дві основні групи: перша включала 'Wilhelm', 'Inger' і 'Warm-maz', друга - 'Tordis', 'Gigantea' та 'Marzencinski'. Найбільш відокремленим серед досліджуваних сортів був '1057' ('Marzencinski'), який водночас виявився найбільш перспективним за комплексом ознак.

Такий розподіл має практичне значення, оскільки дає змогу виділити сорти з подібними морфофізіологічними характеристиками та використовувати ці дані для добору культиварів залежно від напрямку використання біомаси. Зокрема, сорти другої групи, до якої входять 'Tordis', 'Gigantea' і 'Marzencinski', характеризувалися вищими показниками фотосинтетичної ефективності та продуктивного потенціалу.

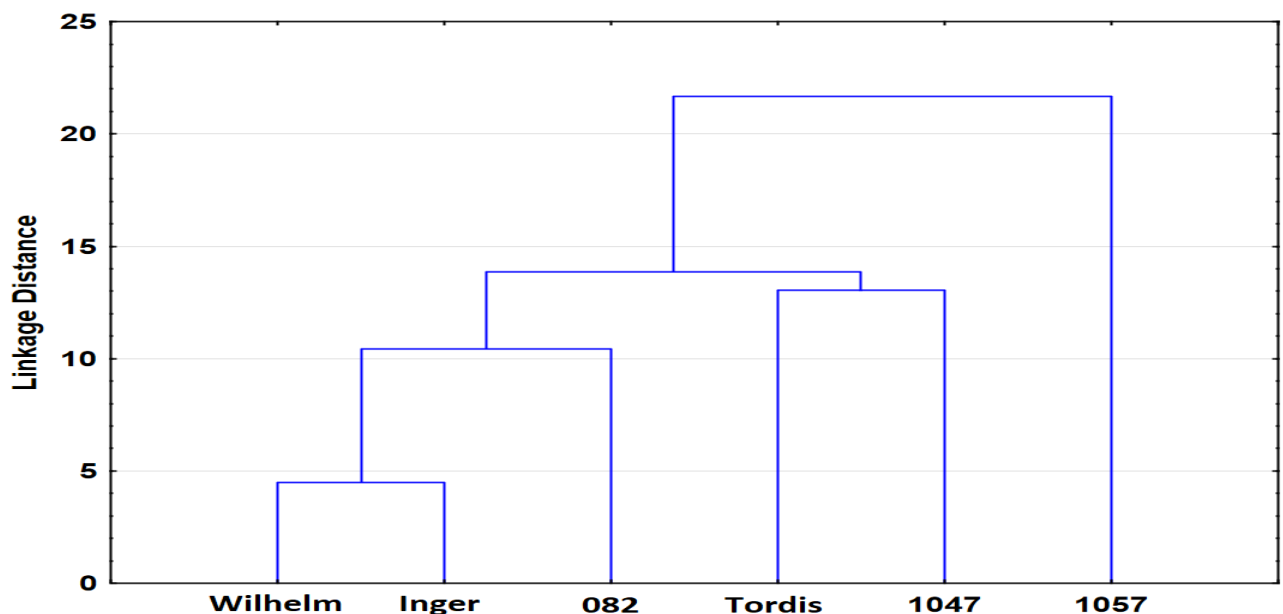


Рис. 3.2.1. Кластеризація сортів верби прутовидної за кількісними характеристиками листків та особливостями фотосинтезу

Порівняльна оцінка сортів *Salix viminalis* L. показала, що вони істотно відрізняються за розвитком асиміляційного апарату, фізіологічною активністю та якісними характеристиками біомаси. Найбільш перспективним за комплексом ознак виявився сорт польської селекції '1057' ('Marzencinski'), який мав найбільшу довжину листка, найвищий показник F_v/F_m , максимальну частку використання сонячної інсоляції та найвищу продуктивність трирічної біомаси.

Сорт '1047' ('Gigantea') також характеризувався високим рівнем розвитку асиміляційного апарату, видовженою формою листків і добрим фізіологічним станом фотосинтетичної системи. З урахуванням даних польських досліджень щодо перспективності *Salix viminalis* var. *gigantea* у короткоротаційних циклах цей сорт можна розглядати як цінний матеріал для енергетичних плантацій.

Сорт '082' ('Warm-maz') поступався 'Marzencinski' і 'Gigantea' за більшістю морфометричних показників, однак характеризувався високою часткою використання сонячної інсоляції та підвищеним вмістом целюлози в біомасі. Це свідчить про його потенційну цінність для окремих напрямів біоенергетичного використання.

Загалом отримані результати узгоджуються з висновками польських дослідників про те, що продуктивність і якість біомаси верби істотно залежать від сортових особливостей, умов вирощування та тривалості циклу заготівлі. Тому для створення енергетичних плантацій в умовах Правобережного Лісостепу України доцільно використовувати сорти, які поєднують високу продуктивність, ефективний фотосинтетичний апарат і сприятливий хімічний склад біомаси.

3.3. Порівняльна характеристика сортів польської та шведської селекції

Одним із важливих завдань під час створення енергетичних плантацій верби прутовидної (*Salix viminalis* L.) є добір сортів, які найкраще адаптовані до конкретних ґрунтово-кліматичних умов і здатні формувати високу продуктивність біомаси. У країнах Європи селекційна робота з вербою

прутовидною проводиться тривалий час, зокрема у Швеції та Польщі, де створено значну кількість сортів і клонів для короткоротаційного вирощування [173–176].

Шведська селекція верби прутувидної орієнтована переважно на створення високопродуктивних, стійких і вирівняних культиварів, придатних до інтенсивних технологій вирощування у коротких ротаціях. До таких сортів належать ‘Tordis’, ‘Inger’ і ‘Wilhelm’. Сорти ‘Tordis’ та ‘Inger’ створені шведською селекційною компанією Svalöf-Weibull AB, а ‘Wilhelm’ також належить до клонових культиварів шведського походження. У дослідженнях енергетичних плантацій ці сорти характеризуються відносно стабільним ростом, добрим розвитком пагонів і достатньо високим потенціалом формування деревної біомаси [173, 175].

Польська селекція верби прутувидної представлена сортами ‘1047’ (‘Gigantea’), ‘1057’ (‘Marzencinski’) та ‘082’ (‘Warm-maz’). Для польських сортів характерне використання як старих форм верби прутувидної, так і селекційних клонів, відібраних або створених для енергетичного використання. Зокрема, ‘Gigantea’ належить до найстаріших польських форм *Salix viminalis*, тоді як ‘Marzencinski’ розглядається як сучасніший селекційний матеріал, орієнтований на підвищення продуктивності біомаси. Сорт ‘Warm-maz’ пов’язують із добром у природних популяціях північної Польщі, зокрема регіону Warmia–Mazury [174, 176].

Порівняння досліджуваних сортів за морфометричними показниками асиміляційного апарату показало істотні відмінності між культиварами польської та шведської селекції. Серед польських сортів найбільш розвиненим листовим апаратом характеризувався ‘1057’ (‘Marzencinski’), у якого загальна довжина листка становила 199,3 мм, довжина листової пластинки - 185,7 мм, а довжина черешка - 13,7 мм. Ці показники були найвищими серед усіх досліджуваних

сортів. Сорт '1047' ('Gigantea') також мав добре розвинений асиміляційний апарат, проте дещо поступався 'Marzencinski' за довжиною листка та листкової пластинки.

Сорт '082' ('Warm-maz') серед польських культиварів характеризувався найнижчими морфометричними показниками. Маса повітряно-сухого листка у нього становила 0,144 г, загальна довжина листка - 171,8 мм, довжина листкової пластинки - 162,2 мм. Це свідчить про менш інтенсивний розвиток асиміляційного апарату порівняно з 'Marzencinski' і 'Gigantea'. Водночас цей сорт мав досить високу частку використання сонячної інсоляції - 58,0 %, що вказує на його здатність ефективно використовувати світлову енергію.

Серед сортів шведської селекції найбільшу масу повітряно-сухого листка мав 'Inger' - 0,212 г, що було найвищим показником серед усіх досліджуваних культиварів. Однак за загальною довжиною листка та довжиною листкової пластинки цей сорт поступався як польському сорту 'Marzencinski', так і шведським сортам 'Tordis' і 'Wilhelm'. Це свідчить про те, що 'Inger' формував ширші та компактніші листки, а не видовжений тип листкової пластинки.

Сорт 'Tordis' характеризувався збалансованим розвитком асиміляційного апарату. Його загальна довжина листка становила 187,1 мм, довжина листкової пластинки - 177,6 мм, ширина листкової пластинки - 17,5 мм. Крім того, він мав високий показник F_v/F_m - 0,753 і частку використання сонячної інсоляції 57,0 %. Це свідчить про добрий фізіологічний стан фотосинтетичного апарату та високу потенційну ефективність фотосистеми II.

Сорт 'Wilhelm' за більшістю морфометричних показників займав проміжне положення між 'Tordis' і 'Inger'. Його загальна довжина листка становила 184,0 мм, довжина листкової пластинки - 173,8 мм, ширина листкової пластинки - 16,8 мм. Водночас показник F_v/F_m у нього був нижчим - 0,722, а частка використання сонячної інсоляції становила 52,0 %. Це свідчить про дещо нижчу фізіологічну

активність фотосинтетичного апарату порівняно з ‘Tordis’ і польським сортом ‘Marzencinski’.

За формою листкової пластинки найбільш видовженими листками характеризувалися саме польські сорти ‘1047’ (‘Gigantea’) і ‘1057’ (‘Marzencinski’). Індекс форми листкової пластинки у ‘Gigantea’ становив 11,8, у ‘Marzencinski’ - 11,7, тоді як у сортів шведської селекції цей показник був нижчим: ‘Tordis’ - 10,1, ‘Wilhelm’ - 9,3, ‘Inger’ - 9,0. Подібна закономірність спостерігалася і за відношенням довжини листка до ширини: у ‘Marzencinski’ цей показник становив 27,81, у ‘Gigantea’ - 26,06, тоді як у ‘Tordis’ - 23,77, ‘Wilhelm’ - 15,44, ‘Inger’ - 13,61. Отже, польські сорти ‘Marzencinski’ і ‘Gigantea’ формували більш видовжений тип листкового апарату, що може бути пов’язано з особливостями їх генотипу та селекційного походження.

Фізіологічна оцінка фотосинтетичного апарату також засвідчила перевагу окремих польських і шведських культиварів. Найвище значення F_v/F_m мав сорт ‘1057’ (‘Marzencinski’) - 0,762. Серед шведських сортів найвищий показник був у ‘Tordis’ - 0,753. Сорт ‘1047’ (‘Gigantea’) мав значення 0,744, що також свідчить про достатньо високий рівень функціонування фотосистеми II. Натомість у сортів ‘Wilhelm’ та ‘Inger’ показник F_v/F_m був нижчим - відповідно 0,722 і 0,716.

За часткою використання сонячної інсоляції найвищі значення мали сорти польської селекції ‘1057’ (‘Marzencinski’) - 60,0 % та ‘082’ (‘Warm-maz’) - 58,0 %. Серед шведських сортів найкращим за цим показником був ‘Tordis’ - 57,0 %. Сорт ‘1047’ (‘Gigantea’) використовував 54,5 % сонячної інсоляції, ‘Wilhelm’ - 52,0 %, а ‘Inger’ - 46,5 %. Отже, за ефективністю використання світлової енергії польські сорти загалом мали певну перевагу, особливо ‘Marzencinski’ і ‘Warm-maz’.

Кластерний аналіз підтвердив відмінності між сортами польської та шведської селекції, проте показав, що групування культиварів визначалося не лише країною походження, а насамперед комплексом морфофізіологічних ознак.

Так, сорти 'Wilhelm', 'Inger' і '082' ('Warm-maz') сформували один кластер, що свідчить про їхню відносну подібність за досліджуваними показниками. Інший кластер утворили 'Tordis', '1047' ('Gigantea') та '1057' ('Marzencinski'). При цьому сорт 'Marzencinski' був найбільш відокремленим, що свідчить про його виражену специфіку та високий продуктивний потенціал.

Отримані результати узгоджуються з літературними даними про те, що продуктивність і морфологічні ознаки сортів та клонів верби істотно залежать від генотипу, умов вирощування, тривалості ротації та агротехнічних чинників [174, 175, 178]. Польські дослідники зазначають, що саме генотип є одним із ключових чинників, який визначає рівень накопичення сухої речовини, інтенсивність росту та придатність сортів до короткоротаційного вирощування [174–176]. Водночас дані щодо шведських культиварів підтверджують, що сорти цієї селекції також мають високий адаптивний і продуктивний потенціал, особливо за умов належного технологічного забезпечення енергетичних плантацій [173, 175, 185].

Таким чином, порівняльна характеристика сортів польської та шведської селекції показала, що найбільш перспективним за комплексом морфофізіологічних ознак був сорт польської селекції '1057' ('Marzencinski'), який поєднував найбільшу довжину листка, високу ефективність фотосистеми II, максимальне використання сонячної інсоляції та найвищу продуктивність біомаси. Сорт '1047' ('Gigantea') також мав високий потенціал завдяки видовженій формі листків і доброму фізіологічному стану асиміляційного апарату. Серед шведських сортів найбільш збалансованими показниками характеризувався 'Tordis', який поєднував добрий розвиток листкового апарату з високим значенням F_v/F_m і ефективним використанням світлової енергії.

Загалом сорти польської селекції відзначалися вищими показниками видовженості листків і ефективності використання сонячної інсоляції, тоді як сорти шведської селекції характеризувалися більшою вирівняністю

морфометричних показників і стабільним розвитком асиміляційного апарату. Це свідчить про доцільність диференційованого підходу до добору сортів *Salix viminalis* L. для енергетичних плантацій з урахуванням їх селекційного походження, морфологічних особливостей і напряму використання біомаси.

Висновки до розділу 3. Установлено, що сорти *Salix viminalis* L. іноземної селекції істотно відрізняються за морфометричними та фізіологічними показниками асиміляційного апарату, що свідчить про значну сортову мінливість і необхідність цілеспрямованого добору культиварів для енергетичних плантацій.

Найбільш перспективним за комплексом ознак був сорт '1057' ('Marzencinski'), який характеризувався найбільшою довжиною листка, високою ефективністю фотосистеми II, максимальною часткою використання сонячної інсоляції та найвищою продуктивністю трирічної біомаси.

Сорт '1047' ('Gigantea') мав високий рівень розвитку асиміляційного апарату, видовжену форму листків і добрий фізіологічний стан фотосинтетичної системи, що підтверджує його придатність для вирощування у короткоротаційних енергетичних насадженнях.

Сорт '082' ('Warm-maz') поступався іншим польським сортам за окремими морфометричними показниками, однак характеризувався високою часткою використання сонячної інсоляції, що може мати значення для окремих напрямів використання біомаси.

Кластерний аналіз підтвердив поділ досліджуваних сортів на дві основні групи за морфологічними ознаками. Найбільш відокремленим і перспективним за комплексом показників був сорт 'Marzencinski'.

Порівняльна характеристика польських і шведських культиварів засвідчила, що сорти польської селекції 'Marzencinski' і 'Gigantea' мали переваги за видовженістю листків і ефективністю використання сонячної інсоляції, тоді як серед шведських сортів найбільш збалансованими морфологічними показниками характеризувався 'Tordis'.

РОЗДІЛ 4

РІСТ, РОЗВИТОК І ПРОДУКТИВНІСТЬ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПЛАНТАЦІЙ ВЕРБИ ПРУТОВИДНОЇ

Верба прутувидна (*Salix viminalis* L.) належить до найбільш перспективних деревних енергетичних культур для створення короткоротаційних плантацій, оскільки характеризується інтенсивним ростом, здатністю до багаторазового відростання після зрізування, високим потенціалом накопичення лігноцелюлозної біомаси та доброю адаптивністю до різних ґрунтово-кліматичних умов [173, 186]. У країнах Європи ця культура широко використовується як сировина для виробництва твердого біопалива, а її продуктивність значною мірою залежить від генотипу, тривалості циклу заготівлі, густоти насаджень і агротехнічних умов вирощування [174, 175, 186].

За даними польських дослідників, сорти й клони верби прутувидної істотно відрізняються за інтенсивністю росту, кількістю пагонів, їх висотою, діаметром і здатністю до накопичення сухої речовини [175, 176]. Саме ці біометричні показники є важливими структурними елементами формування врожайності енергетичної біомаси. Водночас тривалість ротації має істотний вплив на продуктивність насаджень: за збільшення періоду заготівлі біомаси від одного до кількох років урожайність сухої речовини, як правило, зростає, хоча ефективність цього процесу залежить від сортових особливостей і умов вирощування [174, 175, 188].

Важливе значення для оцінки енергетичних плантацій має не лише загальна врожайність біомаси, а й динаміка росту рослин упродовж вегетації, формування пагонів, їх висота, діаметр і здатність сорту підтримувати стабільний приріст у конкретних умовах. Дослідження продуктивності верби на різних типах ґрунтів засвідчують, що добір адаптованих сортів є визначальним чинником підвищення ефективності короткоротаційного вирощування [185, 187].

В умовах Правобережного Лісостепу України вивчення росту, розвитку та продуктивності сортів *Salix viminalis* L. має важливе наукове й практичне значення, оскільки дає змогу визначити культивари з найвищим потенціалом формування сирової та сухої біомаси. Комплексна оцінка біометричних показників і врожайності дозволяє обґрунтувати доцільність використання окремих сортів для створення енергетичних плантацій та підвищення ефективності виробництва біопаливної сировини.

4.1. Особливості росту й розвитку сортів верби прутовидної в умовах Правобережного Лісостепу України

Ріст і розвиток верби прутовидної (*Salix viminalis* L.) у короткоротаційних енергетичних насадженнях є визначальними чинниками формування продуктивності біомаси. Ця культура характеризується інтенсивним пагоноутворенням, швидким наростанням надземної маси та здатністю до багаторазового відростання після зрізування, що забезпечує її придатність для багатоциклового використання у системах short rotation coppice [173, 186]. У сучасних дослідженнях підкреслюється, що продуктивність вербових плантацій залежить не лише від виду або сорту, а й від тривалості циклу заготівлі, густоти насаджень, родючості ґрунту, вологозабезпечення та технологічного рівня вирощування [174, 175, 186].

Одним із ключових критеріїв оцінки сортів верби є біометричні показники рослин, зокрема висота пагонів, їх діаметр, кількість стебел на рослині та маса сформованої деревної біомаси. За даними М. Матука і Р. Radzikowski, сорти верби, вирощені на маргінальних ґрунтах, істотно відрізнялися за продуктивністю та біометричними характеристиками, що свідчить про значну роль генотипу у формуванні врожаю біомаси [185]. Подібні висновки наведено у дослідженнях, присвячених вирощуванню різних культиварів верби в системах

короткої ротації, де встановлено істотну мінливість продуктивності залежно від сорту, місця вирощування та частоти заготівлі [187].

Тривалість ротації також є важливим чинником формування врожайності. За результатами сучасних досліджень, порівняння дво- і трирічних інтервалів заготівлі верби показує, що вибір періоду зрізування істотно впливає на рівень одержаної деревної біомаси [188]. Це підтверджує доцільність оцінювання ростових процесів не лише в межах одного року, а й упродовж усього ротаційного циклу.

Окремі дослідження присвячені вивченню початкового росту живців сортів *Salix viminalis* L. 'Inger' і 'Tordis' під впливом води, гіберелової та гумінової кислот. Установлено, що вже на ранніх етапах розвитку сорти можуть істотно відрізнятися за інтенсивністю росту, формуванням пагонів і реакцією на стимулювальні чинники [189]. Це свідчить про важливість сортового добору ще на етапі закладання плантацій.

Умови Правобережного Лісостепу України характеризуються достатнім потенціалом для вирощування багаторічних енергетичних культур, однак реалізація продуктивного потенціалу верби прутovidної значною мірою залежить від генотипових особливостей, забезпечення рослин вологою, родючості ґрунту та тривалості вегетаційного періоду. Тому оцінка росту й розвитку сортів *Salix viminalis* L. у цій зоні є необхідною для визначення найбільш адаптованих і продуктивних культиварів.

У цьому підрозділі основну увагу приділено аналізу сортових відмінностей за інтенсивністю росту, формуванням пагонів, висотою рослин, діаметром стебел і здатністю до накопичення енергетичної біомаси. Такий підхід дає змогу встановити, які сорти найповніше реалізують свій продуктивний потенціал у конкретних умовах вирощування та можуть бути рекомендовані для створення енергетичних плантацій у Правобережному Лісостепу України.

Оцінка росту і продуктивності шестирічних плантацій іноземних сортів верби прутовидної показала істотні відмінності між досліджуваними культиварами за кількістю пагонів, висотою, діаметром стебел, масою одного куща та врожайністю сирої і сухої біомаси.

За кількістю пагонів на один кущ найбільше значення встановлено у сорту 'Warm-maz', 4,2 шт., а також у сорту 'Gigantea', 3,6 шт. Сорт 'Marzencinski' формував у середньому 2,6 пагона на кущ, 'Tordis', 2,0 пагони. Найменшу кількість пагонів мали шведські сорти 'Wilhelm' і 'Inger', відповідно 1,4 і 1,6 шт. Проте менша кількість пагонів у цих сортів компенсувалася більшими показниками діаметра стебел і маси одного куща (табл. 4.1.1.).

Таблиця 4.1.1

Показники росту і продуктивності шестирічних плантацій деяких іноземних сортів за густоти садіння 15,0 тис. шт./га

| Сорт, країна | Кількість пагонів, шт. | Середня висота пагонів, м | Середній діаметр пагона на висоті 1,3 м, см | Сира маса одного куща, кг | Урожайність, т/га | | Середній приріст сухої біомаси за 1 рік, т/га |
|--------------------------|------------------------------|------------------------------------|---|---------------------------------|----------------------|-------|--|
| | | | | | сира | суха | |
| 'Marzencinski' Польща | 2,6 | 7,0±0,15 | 3,1±0,19 | 3,3±0,47 | 41,2 | 20,60 | 3,43 |
| 'Gigantea' Польща | 3,6 | 7,0±0,18 | 2,5±0,12 | 2,3±0,20 | 27,6 | 13,8 | 2,30 |
| 'Warm-maz' Польща | 4,2 | 6,7±0,24 | 2,3±0,18 | 2,1±0,26 | 17,2 | 8,60 | 1,43 |
| 'Wilhelm, Швеція | 1,4 | 7,8±0,17 | 4,0±0,17 | 5,1±0,48 | 63,7 | 31,85 | 5,31 |
| 'Inger' Швеція | 1,6 | 7,7±0,29 | 3,7±0,40 | 6,1±1,27 | 76,2 | 38,1 | 6,35 |
| 'Tordis' Швеція | 2,0 | 5,9±0,20 | 2,5±0,27 | 2,7±0,47 | 22,5 | 11,3 | 1,88 |

Найбільша середня висота пагонів була характерна для сортів шведської селекції 'Wilhelm' і 'Inger', відповідно 7,8 і 7,7 м. Дещо нижчими, але також високими показниками характеризувалися польські сорти 'Marzencinski' і

‘Gigantea’, по 7,0 м. Сорт ‘Warm-maz’ мав середню висоту пагонів 6,7 м, а найнижчим за цим показником був ‘Tordis’, 5,9 м.

За середнім діаметром пагона на висоті 1,3 м перевагу також мали сорти ‘Wilhelm’ і ‘Inger’, відповідно 4,0 і 3,7 см. Сорт ‘Marzencinski’ мав діаметр 3,1 см. У сортів ‘Gigantea’ і ‘Tordis’ цей показник становив 2,5 см, а у ‘Warm-maz’, 2,3 см. Отже, найбільш потужні пагони формували саме шведські сорти ‘Wilhelm’ та ‘Inger’.

Сира маса одного куща була найвищою у сорту ‘Inger’, 6,1 кг, та у сорту ‘Wilhelm’, 5,1 кг. Серед польських сортів найбільшу масу одного куща мав ‘Marzencinski’, 3,3 кг. У сортів ‘Tordis’, ‘Gigantea’ і ‘Warm-maz’ цей показник становив відповідно 2,7; 2,3 і 2,1 кг.

Найвищу урожайність сирої біомаси забезпечив сорт ‘Inger’, 76,2 т/га. Дещо нижчий, але також високий показник встановлено у сорту ‘Wilhelm’, 63,7 т/га. Сорт ‘Marzencinski’ сформував 41,2 т/га сирої біомаси. Значно нижча урожайність була у сортів ‘Gigantea’, 27,6 т/га, ‘Tordis’, 22,5 т/га, та ‘Warm-maz’, 17,2 т/га.

За урожайністю сухої біомаси найбільш продуктивними були сорти ‘Inger’ і ‘Wilhelm’, відповідно 38,10 і 31,85 т/га. Серед польських сортів найвищий показник мав ‘Marzencinski’, 20,60 т/га. Сорт ‘Gigantea’ сформував 13,80 т/га сухої біомаси, ‘Tordis’, 11,30 т/га, а ‘Warm-maz’, 8,60 т/га. Середній приріст сухої біомаси за один рік був найвищим у сортів ‘Inger’ і ‘Wilhelm’, відповідно 6,35 і 5,31 т/га. У сорту ‘Marzencinski’ він становив 3,43 т/га, у ‘Gigantea’, 2,30 т/га, у ‘Tordis’, 1,88 т/га, а у ‘Warm-maz’, 1,43 т/га.

Отже, за шестирічного циклу вирощування без проміжного зрізування найвищу продуктивність забезпечили сорти шведської селекції ‘Inger’ і ‘Wilhelm’. Їх перевага зумовлена формуванням більш потужних пагонів, більшою масою одного куща та вищою здатністю до накопичення сухої біомаси.

Серед сортів польської селекції найкращим за комплексом показників був 'Marzencinski'.

4.2. Відростання однорічної біомаси після зрізування шестирічних плантацій

Після зрізування шестирічних рослин було проведено оцінку росту і продуктивності однорічної біомаси, що відросла з пеньків. Отримані результати показали, що зрізування надземної частини сприяло активному пагоноутворенню у всіх досліджуваних сортів (табл. 4.2.1.).

Таблиця 4.2.1.

Показники росту і продуктивності однорічної біомаси, що виросла після зрізання шестирічних плантацій деяких іноземних сортів за густоти садіння 15,0 тис. шт./га

| Сорт | Показники росту і продуктивності однорічної біомаси | | | | | Середній приріст сухої біомаси за 7 років, т/га/рік |
|----------------|---|------------------------|---------------------------|-----------------------|------|---|
| | Кількість пагонів на 1 кущ, шт. | Середня висота куща, м | Сира маса одного куща, кг | Урожайність, т/га/рік | | |
| | | | | сира | суха | |
| 'Marzencinski' | 14,4 | 2,7±0,14 | 1,105 | 13,8 | 6,9 | 3,9 |
| 'Gigantea' | 14,8 | 2,3±0,08 | 0,920 | 11,0 | 5,5 | 2,8 |
| 'Warm-maz' | 14,8 | 2,0±0,04 | 0,610 | 7,3 | 3,7 | 1,8 |
| 'Wilhelm' | 9,2 | 2,4±0,12 | 0,825 | 9,9 | 5,0 | 5,3 |
| 'Inger' | 16,0 | 3,0±0,11 | 1,335 | 16,0 | 8,0 | 6,6 |
| 'Tordis' | 8,4 | 2,1±0,14 | 0,495 | 5,9 | 3,0 | 2,0 |

Найбільшу кількість пагонів на один кущ сформував сорт 'Inger', 16,0 шт. Високими показниками кущистості також характеризувалися сорти 'Gigantea' і 'Warm-maz', по 14,8 шт., а також 'Marzencinski', 14,4 шт. Сорт 'Wilhelm' формував 9,2 пагона на кущ, а найменший показник був у сорту 'Tordis', 8,4 шт. Це свідчить, що після зрізування більшість сортів активно відновлювали надземну масу за рахунок утворення значної кількості нових пагонів.

За середньою висотою однорічної біомаси перевагу мав сорт 'Inger', 3,0 м. Сорт 'Marzencinski' досягав висоти 2,7 м, 'Wilhelm', 2,4 м, 'Gigantea', 2,3 м, 'Tordis',

2,1 м, а ‘Warm-maz’, 2,0 м. Найбільшу сиру масу одного куща також сформував ‘Inger’, 1,335 кг. Дещо нижчим цей показник був у сорту ‘Marzencinski’, 1,105 кг. У сортів ‘Gigantea’, ‘Wilhelm’, ‘Warm-maz’ і ‘Tordis’ сира маса одного куща становила відповідно 0,920; 0,825; 0,610 і 0,495 кг.

Найвищу урожайність сирої біомаси за однорічний період відростання забезпечив сорт ‘Inger’, 16,0 т/га/рік. Сорт ‘Marzencinski’ сформував 13,8 т/га/рік, ‘Gigantea’, 11,0 т/га/рік, ‘Wilhelm’, 9,9 т/га/рік. Нижчі показники мали сорти ‘Warm-maz’ і ‘Tordis’, відповідно 7,3 і 5,9 т/га/рік.

За урожайністю сухої біомаси найкращим також був сорт ‘Inger’, 8,0 т/га/рік. Сорт ‘Marzencinski’ сформував 6,9 т/га/рік, ‘Gigantea’, 5,5 т/га/рік, ‘Wilhelm’, 5,0 т/га/рік. У сортів ‘Warm-maz’ і ‘Tordis’ урожайність сухої біомаси становила відповідно 3,7 і 3,0 т/га/рік.

Порівняння приросту однорічної біомаси з середнім приростом сухої біомаси за весь семирічний період показало, що у більшості досліджуваних сортів інтенсивність відростання після зрізування була вищою, ніж середньорічне накопичення біомаси за попередній період існування плантацій. Це свідчить про позитивний вплив омолоджувального зрізування на активізацію пагоноутворення та формування продуктивної біомаси. Найбільш ефективно після зрізування відростали сорти ‘Inger’, ‘Marzencinski’ і ‘Gigantea’.

Отже, результати оцінки однорічної біомаси після зрізування шестирічних плантацій підтверджують доцільність скорочення циклу заготівлі біомаси. Надмірне подовження періоду вирощування без зрізування може призводити до зниження середньорічної продуктивності, тоді як періодичне зрізування стимулює утворення нових пагонів і підтримує біологічну активність насаджень.

4.3. Продуктивність восьмирічних плантацій верби прутовидної

Дослідження восьмирічних плантацій сортів верби прутовидної, які зростали без зрізування надземної біомаси, показали подальше зниження

середнього річного приросту сухої речовини. Це свідчить про недоцільність надмірного подовження циклу вирощування без заготівлі біомаси, оскільки з віком насаджень зменшується інтенсивність приросту, погіршується фітосанітарний стан рослин і зростає частка пошкоджених пагонів (табл. 4.3.1.).

Таблиця 4.3.1.

Показники росту і продуктивності біомаси восьмирічних плантацій сортів верби прутovidної за густоти садіння 15,0 тис. шт./га

| Сорт | Кількість пагонів на 1 кущ, шт. | Середня висота куща, м | Сира маса одного куща, кг | Збереженість рослин, % | Урожайність, т/га | | Середній приріст сухої біомаси за 8 років, т/га/рік |
|----------------|---------------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------|-------|---|
| | | | | | сира | суха | |
| 'Marzencinski' | 3,7 | 6,00±0,14 | 4,44 | 58,6 | 39,3 | 19,65 | 2,46 |
| 'Gigantea' | 7,2 | 4,70±0,28 | 3,26 | 39,1 | 19,1 | 9,55 | 1,19 |
| 'Warm-maz' | 3,8 | 5,90±0,15 | 4,67 | 57,1 | 40,0 | 20,00 | 2,50 |
| 'Wilhelm' | 6,0 | 5,90±0,15 | 5,66 | 73,3 | 62,2 | 31,10 | 3,89 |
| 'Inger' | 5,6 | 6,64±0,25 | 12,65 | 38,9 | 73,8 | 36,90 | 4,61 |
| 'Tordis' | 2,1 | 4,97±0,18 | 3,67 | 40,0 | 22,0 | 11,00 | 1,38 |

У восьмирічному віці сорти істотно відрізнялися за кількістю пагонів на кущ. Найбільшу куцистість мав сорт 'Gigantea', 7,2 пагона на кущ. Високі показники також відмічено у сортів 'Wilhelm', 6,0 пагонів, та 'Inger', 5,6 пагонів. Сорти 'Warm-maz' і 'Marzencinski' формували відповідно 3,8 і 3,7 пагона на кущ. Найменша кількість пагонів була у сорту 'Tordis', 2,1 шт.

Середня висота куща у восьмирічному віці була найвищою у сорту 'Inger', 6,64 м. Сорт 'Marzencinski' мав висоту 6,00 м, а 'Wilhelm' і 'Warm-maz', по 5,90 м. Нижчими за висотою були сорти 'Tordis', 4,97 м, та 'Gigantea', 4,70 м. Порівняно з шестирічними насадженнями, середня висота рослин у восьмирічному віці в окремих варіантах була нижчою, що може бути пов'язано з

пошкодженням пагонів, відмиранням верхівок і зниженням інтенсивності ростових процесів.

За сировою масою одного куща значну перевагу мав сорт 'Inger', 12,65 кг. У сорту 'Wilhelm' цей показник становив 5,66 кг, у 'Warm-maz', 4,67 кг, у 'Marzencinski', 4,44 кг. Сорти 'Tordis' і 'Gigantea' мали нижчі значення, відповідно 3,67 і 3,26 кг.

Збереженість рослин істотно впливала на кінцеву урожайність біомаси. Найвищим показником збереженості характеризувався сорт 'Wilhelm', 73,3 %. У сортів 'Marzencinski' і 'Warm-maz' збереженість становила відповідно 58,6 і 57,1 %. Значно нижчі показники мали сорти 'Tordis', 40,0 %, 'Gigantea', 39,1 %, та 'Inger', 38,9 %. Водночас, незважаючи на нижчу збереженість рослин, сорт 'Inger' сформував найвищу урожайність завдяки значній масі одного куща.

Найвищу урожайність сирової біомаси у восьмирічному віці забезпечив сорт 'Inger', 73,8 т/га. Високий показник мав також сорт 'Wilhelm', 62,2 т/га. Сорти 'Warm-maz' і 'Marzencinski' сформували відповідно 40,0 і 39,3 т/га сирової біомаси. Значно нижчою була урожайність сортів 'Tordis' і 'Gigantea', відповідно 22,0 і 19,1 т/га.

За урожайністю сухої біомаси найпродуктивнішим був сорт 'Inger', 36,90 т/га. Сорт 'Wilhelm' сформував 31,10 т/га сухої біомаси. У сортів 'Warm-maz' і 'Marzencinski' цей показник був близьким і становив відповідно 20,00 та 19,65 т/га. Нижчу продуктивність мали сорти 'Tordis', 11,00 т/га, і 'Gigantea', 9,55 т/га.

Середній приріст сухої біомаси за 8 років був найвищим у сорту 'Inger', 4,61 т/га/рік. У сорту 'Wilhelm' він становив 3,89 т/га/рік, у 'Warm-maz', 2,50 т/га/рік, у 'Marzencinski', 2,46 т/га/рік. Найнижчі значення зафіксовано у сортів 'Tordis' і 'Gigantea', відповідно 1,38 та 1,19 т/га/рік.

Отримані результати свідчать, що у восьмирічних насадженнях, які тривалий час зростали без зрізування, відбувалося зниження середньорічного

приросту сухої біомаси. У багатьох рослин спостерігалися пошкодження пагонів, всихання верхівок, переламування стебел і часткове відмирання кущів. Це вказує на настання етапу старіння насаджень і підтверджує необхідність періодичного зрізування надземної частини як заходу омолодження та підтримання продуктивності.

Попри філогенетичну близькість досліджуваних культиварів, оскільки всі вони створені на основі верби прутувидної, до восьмирічного віку вони суттєво відрізнялися за морфометричними характеристиками, збереженістю рослин і урожайністю енергетичної біомаси. Найбільш стабільними за комплексом показників були сорти 'Inger' і 'Wilhelm'. Сорт 'Inger' забезпечував найвищу урожайність сухої біомаси, а 'Wilhelm' поєднував високу продуктивність із найкращою збереженістю рослин (рис.4.3.1.).

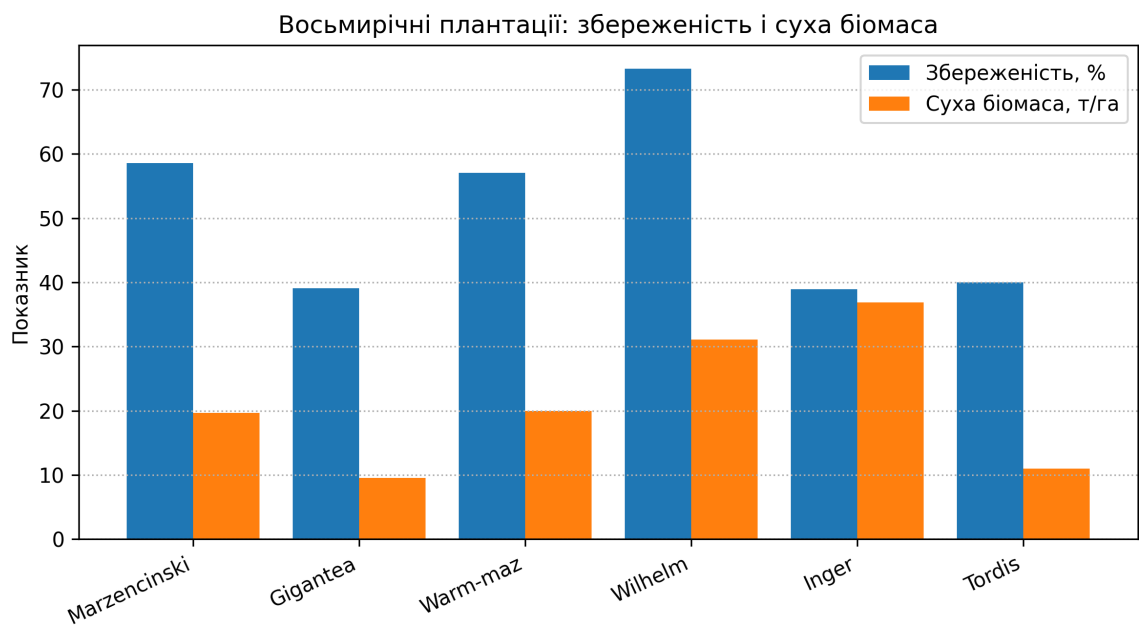


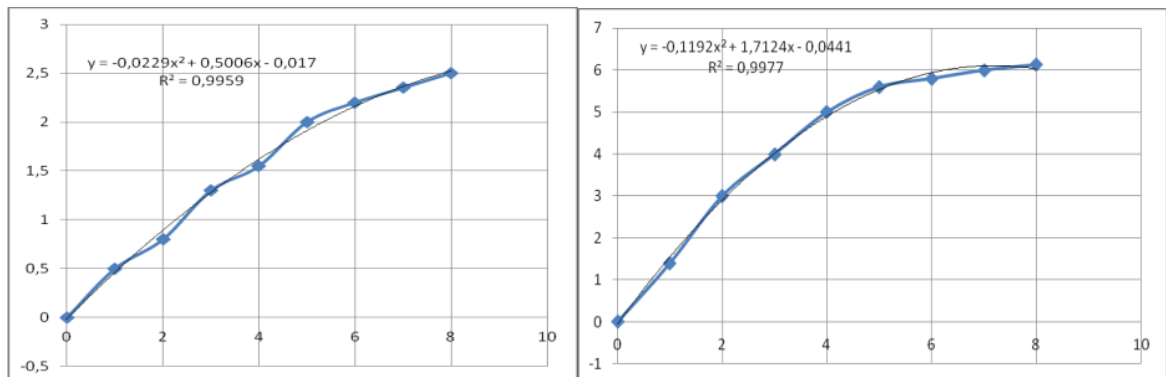
Рис. 4.3.1. Збереженість рослин і урожайність сухої біомаси восьмирічних плантацій верби прутувидної

Дослідження багаторічних вербових плантацій із використанням підходів лісової таксації дає змогу встановити річні прирости модельних пагонів за висотою, діаметром і масою. Це, у свою чергу, дозволяє визначити вік досягнення

максимального приросту біомаси, після якого доцільно проводити заготівлю енергетичної сировини.

4.4. Хід росту пагонів за висотою і діаметром та обґрунтування строків заготівлі біомаси

Визначення особливостей приросту за висотою і діаметром восьмирічних плантацій досліджуваних сортів верби прутовидної було проведено навесні 2023 року. Отримані результати показали, що на час проведення досліджень насаджень мали ознаки істотного сповільнення ростових процесів. Приріст рослин за діаметром і висотою в останні роки значно зменшувався, що свідчить про поступове зниження біологічної активності насаджень і перехід їх до етапу старіння.



1

2

Рис. 4.4.1. Хід росту за діаметром, см (1), і за висотою, м (2), середніх стовбурів сорту верби прутовидної 'Wilhelm' (без кори)

Як видно з даних рис. 4.4. 1, річний приріст за діаметром у рослин сорту 'Wilhelm' був близьким до прямолінійного, хоча в останні роки спостерігався певний тренд до його зниження. На час проведення досліджень середні за розмірами стовбури цього сорту на висоті 1,3 м мали діаметр 2,5 см. Ще більш вираженим було зменшення приросту за висотою. У перші чотири роки рослини

стабільно нарощували висоту і досягли близько 5,0 м, тоді як за наступні чотири роки приріст становив лише 1,13 м. Суха маса середнього пагона сорту ‘Wilhelm’ становила 0,995 кг. Це свідчить, що насадження такого типу доцільно зрізувати для отримання енергетичної біомаси після четвертого року вирощування.

На всіх представлених графіках товща лінія відображає фактичний хід росту пагонів, а тонка лінія - модель ростових процесів, отриману з використанням пакета STATISTICA. Отримані рівняння добре узгоджувалися з фактичними даними, що підтверджується високим рівнем апроксимації, оскільки коефіцієнт детермінації R^2 в усіх випадках перевищував 0,99.

Схожі особливості приросту за висотою і діаметром встановлено у рослин сорту ‘Tordis’ (рис. 4.4.2). У восьмирічному віці вони мали дещо вищі показники порівняно з сортом ‘Wilhelm’: діаметр середнього стовбура без кори становив 3,1 см, висота - 6,25 м, а абсолютно суха маса середнього стовбура - 1,67 кг. Це свідчить про збереження вищої інтенсивності росту цього сорту у старшому віці.

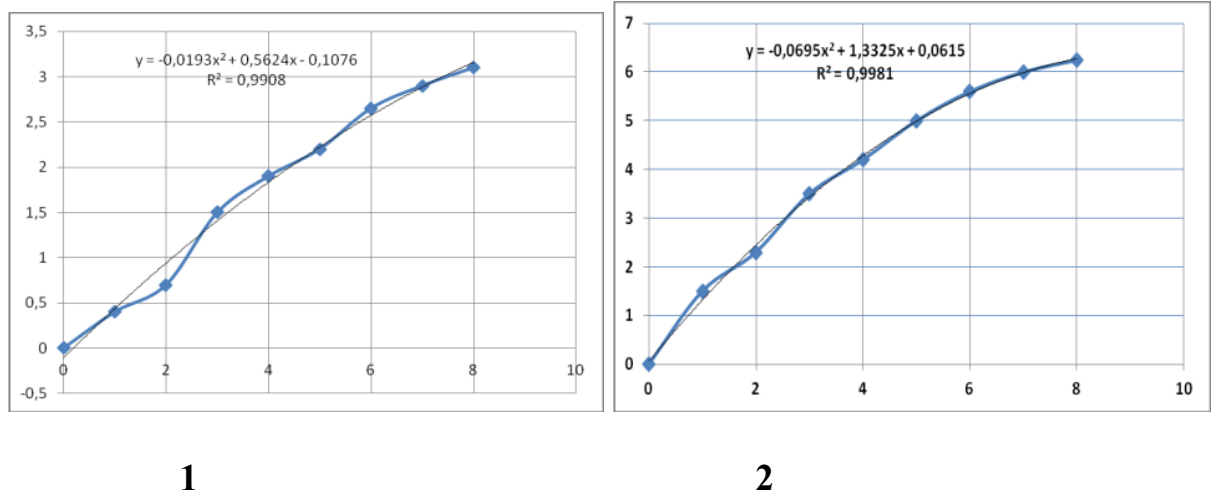


Рис. 4.4.2. Хід росту за діаметром, см (1), і за висотою, м (2), середніх стовбурів сорту верби прутоїдної ‘Tordis’ (без кори)

Серед досліджуваних сортів найвищими біометричними показниками у восьмирічному віці характеризувався сорт ‘Inger’ (рис. 4.4.3). Діаметр середнього

стовбура становив 3,3 см, висота - 6,42 м, а суха маса середнього пагона - 1,76 кг. Найбільш інтенсивне зростання показників висоти й діаметра у цього сорту спостерігалось до чотирирічного віку. Отже, для плантацій сорту 'Inger' доцільним є проведення заготівлі енергетичної біомаси у віці 4-5 років.

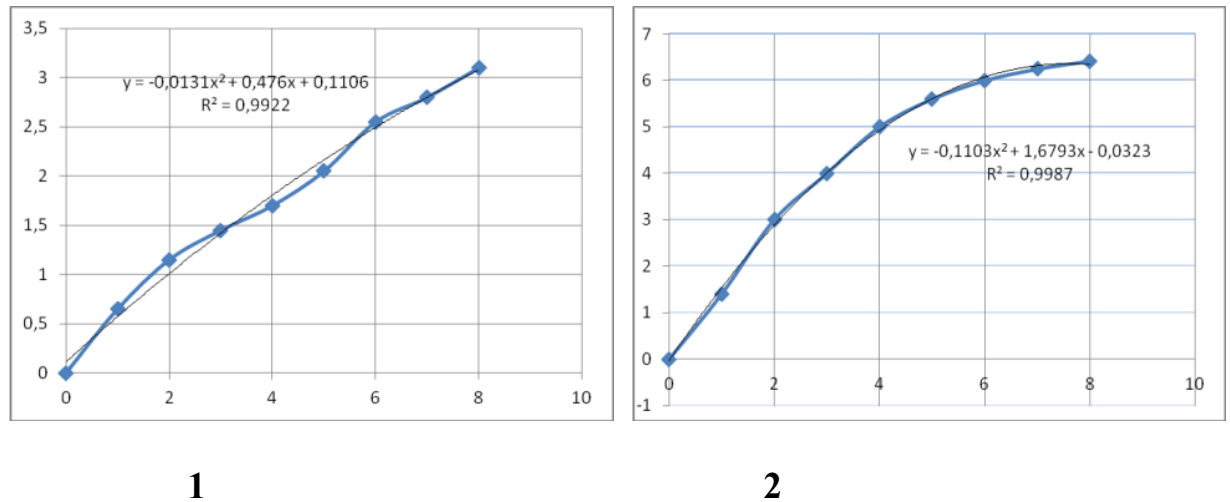


Рис. 4.4.3. Хід росту за діаметром, см (1), і за висотою, м (2), середніх стовбурів сорту верби прутовидної 'Inger' (без кори)

Важливо зазначити, що 'Inger' є єдиним серед досліджуваних сортів гібридом верби тритичинкової (*Salix triandra* L.) і верби прутовидної (*Salix viminalis* L.). Це може частково пояснювати його вищі показники росту, біомаси та адаптивності, оскільки міжвидові гібриди верби часто характеризуються підвищеною життєздатністю, інтенсивним ростом і кращою здатністю до відростання після зрізування.

У сорту '082' ('Warm-maz') після четвертого року суттєво знижувалися показники приросту за діаметром, а після третього року - приріст за висотою (рис. 4.4.4). Це свідчить про доцільність заготівлі біомаси цього сорту у віці 3-4 років. У восьмирічному віці його пагони мали висоту 5,90 м, діаметр 2,3 см і суху масу 0,938 кг.

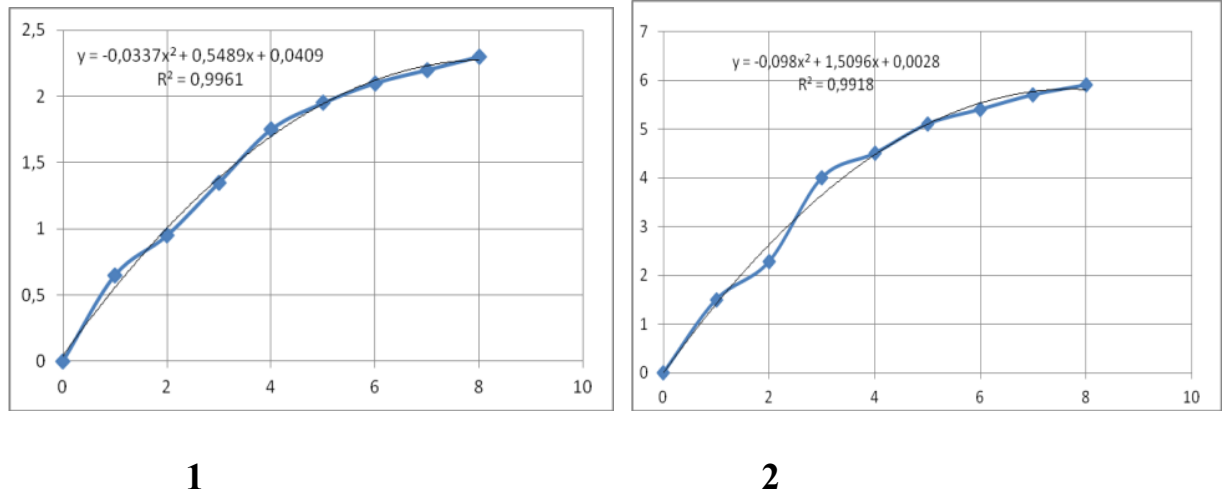


Рис. 4.4.4. Хід росту за діаметром, см (1), і за висотою, м (2), середніх стовбурів сорту верби прутувидної '082' ('Warm-maz') (без кори)

Подібні особливості росту мав сорт '1047' ('Gigantea') (рис. 4.4.5). Його приріст за висотою і діаметром різко зменшувався після четвертого року, тому саме цей вік можна розглядати як оптимальний для першої заготівлі енергетичної біомаси. Суха маса одного середнього восьмирічного стовбура цього сорту становила 0,89 кг, висота - 5,97 м, діаметр - 1,85 см.

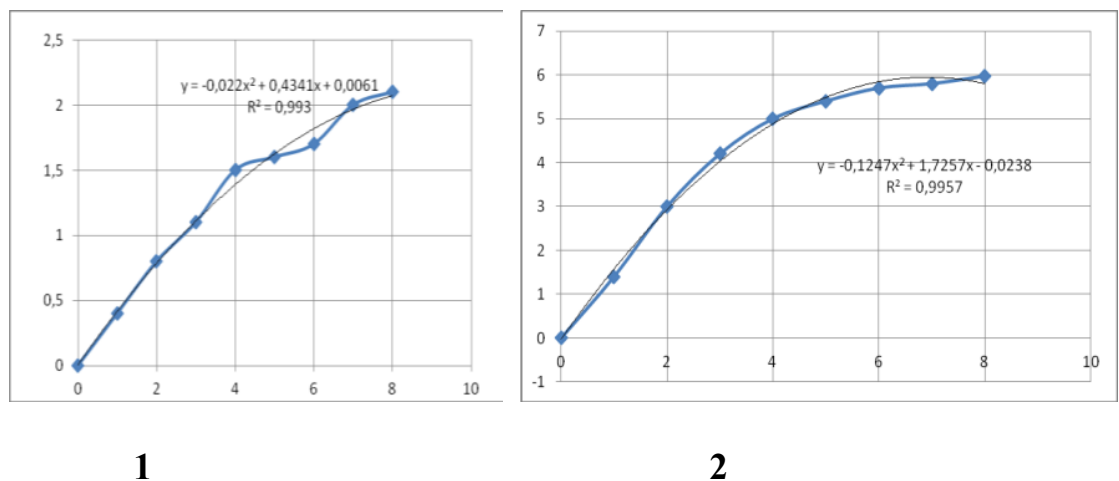


Рис. 4.4.5. Хід росту за діаметром, см (1), і за висотою, м (2), середніх стовбурів сорту верби прутувидної '1047' ('Gigantea') (без кори)

Останній із досліджуваних сортів польської селекції - '1057' ('Marzencinski') - мав дещо вищі біометричні показники порівняно з двома іншими польськими сортами (рис. 4.4.6). Його висота становила 6,11 м, діаметр - 2,55 см, а суха маса середнього пагона - 1,05 кг. Це свідчить про кращий ріст і вищий потенціал накопичення біомаси порівняно з 'Gigantea' та 'Warm-maz'.

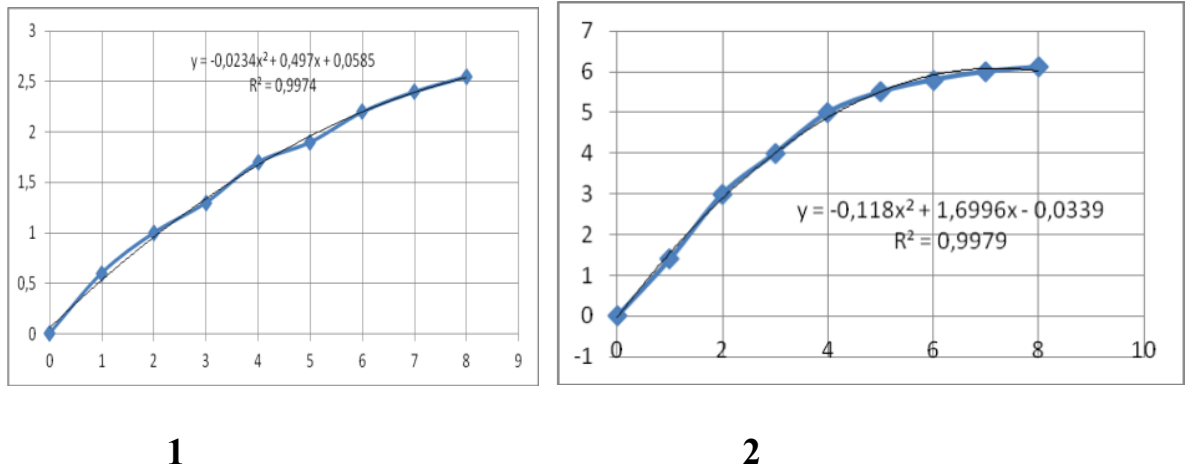


Рис. 4.4.6. Хід росту за діаметром, см (1), і за висотою, м (2), середніх стовбурів сорту верби прутоївної '1057' ('Marzencinski') (без кори)

Отже, результати досліджень показали, що плантації досліджуваних сортів істотно відрізнялися між собою за біометричними показниками, зокрема за висотою, діаметром і масою пагонів, а відповідно і за продуктивністю біомаси. Найвищі значення цих показників встановлено у сорту 'Inger': висота 6,42 м, діаметр 3,3 см, суха маса середнього пагона 1,76 кг. Дещо нижчими, але також високими показниками характеризувався сорт 'Tordis': відповідно 6,25 м, 3,1 см і 1,67 кг. У решти сортів значення були помітно нижчими і знаходилися в межах: висота від 5,90 м у 'Warm-maz' до 6,13 м у 'Wilhelm', діаметр від 1,85 см у 'Gigantea' до 2,55 см у 'Marzencinski', суха маса пагонів від 0,89 кг у 'Gigantea' до 1,05 кг у 'Marzencinski'.

Найбільшою продуктивністю сухої біомаси у восьмирічному віці характеризувалися сорти 'Inger' - 36,90 т/га та 'Wilhelm' - 31,10 т/га. Найнижчу

урожайність сформував сорт ‘Gigantea’ - 9,55 т/га. Сорт ‘Tordis’ забезпечив 11,00 т/га сухої біомаси, тоді як у сортів ‘Marzencinski’ та ‘Warm-maz’ урожайність була близькою і становила відповідно 19,65 та 20,00 т/га. Показник продуктивності залежав не лише від розмірів пагонів і їх маси, а й від збереженості рослин кожного сорту та кількості пагонів на одну рослину.

У всіх досліджуваних сортів зафіксовано тенденцію до суттєвого зменшення річних приростів за висотою і діаметром після досягнення рослинами віку 3-5 років. Найчастіше сповільнення росту починалося після четвертого року. Зокрема, значне зменшення приросту за висотою у сортів ‘Wilhelm’, ‘Inger’, ‘Gigantea’ і ‘Marzencinski’ починалося після чотирирічного віку, у ‘Tordis’ - після п’ятого, а у ‘Warm-maz’ - після третього року. Приріст за діаметром у сорту ‘Wilhelm’ різко знижувався після п’ятого року, у ‘Tordis’ - після третього, а у решти сортів - після четвертого року.

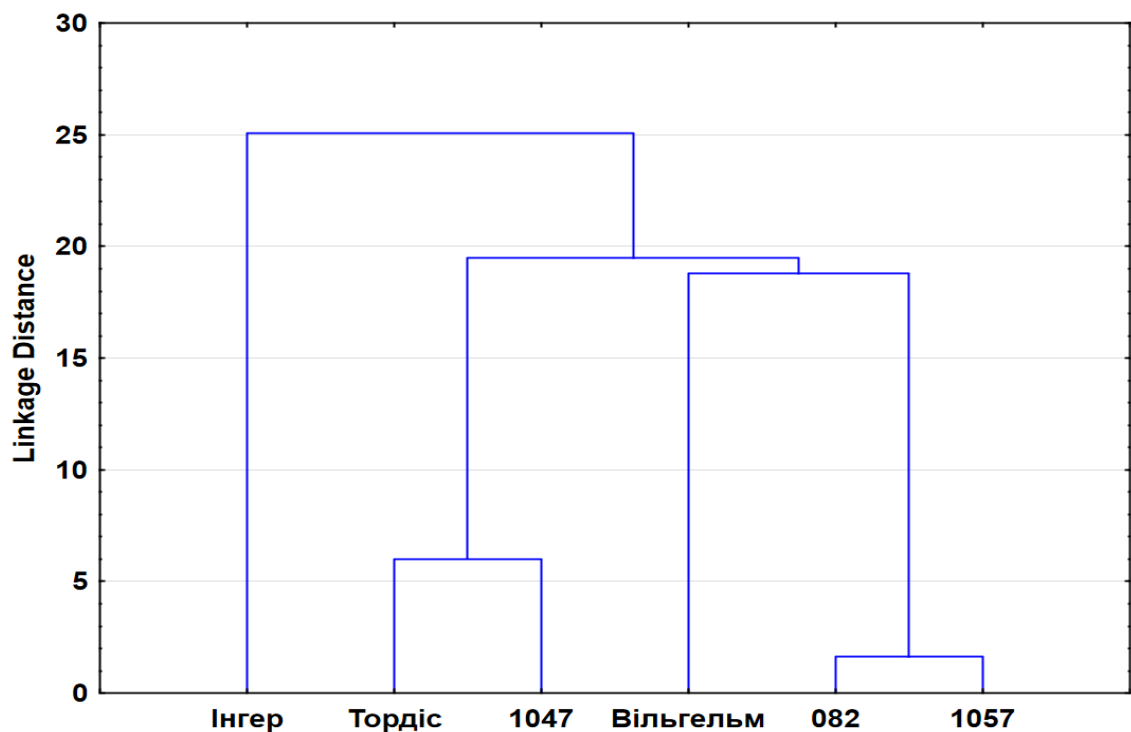


Рис. 4.4.7. Евклідові відстані між восьмирічними деревами у насадженнях сортів верби прутовидної

Евклідові відстані між досліджуваними сортами підтвердили наявність помітних відмінностей за комплексом біометричних показників. Найбільше віддалення між сортами свідчить про різну інтенсивність росту, неоднакову здатність до накопичення біомаси та різний рівень адаптації до умов вирощування. Такі результати можуть бути використані для групування сортів за продуктивним потенціалом і визначення найбільш перспективних культиварів для створення енергетичних плантацій.

Заготівля енергетичної біомаси на плантаціях верби переважно проводиться з періодичністю два-три роки, проте результати проведених досліджень показали, що перше зрізування надземної частини у багатьох випадках доцільно виконувати у чотирирічному віці. Це пов'язано з тим, що в перший рік після садіння рослини формуються з живців і значну частину пластичних речовин витрачають на утворення кореневої системи, що обмежує накопичення біомаси в надземній частині. Наступні генерації після зрізування відростають значно інтенсивніше завдяки наявності добре розвиненої кореневої системи, тому для них ротацію можна скорочувати до трьох або навіть двох років.

Таким чином, серед сортів верби прутувидної, що вирощуються для отримання енергетичної біомаси, встановлено істотні відмінності за біолого-екологічними особливостями, морфометричними показниками та продуктивністю. Із шести досліджуваних сортів на вилугуваних чорноземах Правобережного Лісостепу України найвищі показники висоти, діаметра і сухої маси середнього пагона мали сорти 'Inger' і 'Tordis'. Найбільшу продуктивність сухої біомаси у восьмирічному віці забезпечили сорти 'Inger' і 'Wilhelm'. Водночас у насадженнях усіх сортів виявлено істотне зменшення річних приростів після досягнення віку 3-5 років, що обґрунтовує доцільність проведення першої заготівлі енергетичної біомаси переважно у чотирирічному віці.

4.5. Продуктивність однорічної та трирічної біомаси після зрізування насаджень верби прутовидної

Серед видів верб, що використовуються для отримання енергетичної біомаси, переважають сорти і гібриди верби прутовидної (*Salix viminalis* L.). Водночас навіть у межах одного виду культивари можуть суттєво відрізнятися між собою за біолого-екологічними особливостями, морфометричними показниками, інтенсивністю відростання після зрізування та продуктивністю надземної біомаси.

Із шести досліджуваних сортів верби прутовидної, вирощених на вилугуваних чорноземах Правобережного Лісостепу України, найбільші показники середньої висоти пагонів восьмирічних рослин мали сорти 'Inger' – 6,42 м та 'Tordis' – 6,25 м. Середня висота решти сортів змінювалася від 5,90 м у сорту 'Warm-maz' до 6,13 м у сорту 'Wilhelm'.

Найбільший середній діаметр пагона на висоті 1,3 м встановлено у рослин сортів 'Inger' – 3,3 см та 'Tordis' – 3,1 см. У решти досліджуваних сортів цей показник змінювався від 1,85 см у 'Gigantea' до 2,55 см у 'Marzencinski'. Суха маса середніх пагонів також була найвищою у сортів 'Inger' – 1,76 кг та 'Tordis' – 1,67 кг. У решти сортів вона становила від 0,89 кг у 'Gigantea' до 1,05 кг у сорту 'Marzencinski'.

Таблиця 4.5.1.

Показники росту і продуктивності однорічної біомаси, що вироста після зрізання семирічних плантацій деяких іноземних сортів за густоти садіння 15,0 тис. шт./га

| Сорт | Показники росту і продуктивності однорічної біомаси | | | | | Середній приріст сухої біомаси за 7 років, т/га/рік |
|----------------|---|------------------------|---------------------------|-----------------------|------|---|
| | Кількість пагонів на 1 кущ, шт. | Середня висота куща, м | Сира маса одного куща, кг | Урожайність, т/га/рік | | |
| | | | | сира | суха | |
| 'Marzencinski' | 14,4 | 2,7±0,14 | 1,105 | 13,8 | 6,9 | 2,46 |
| 'Gigantea' | 14,8 | 2,3±0,08 | 0,920 | 11,0 | 5,5 | 1,19 |

| | | | | | | |
|------------|------|----------|-------|------|-----|------|
| 'Warm-maz' | 14,8 | 2,0±0,04 | 0,610 | 7,3 | 3,7 | 2,50 |
| 'Wilhelm' | 9,2 | 2,4±0,12 | 0,825 | 9,9 | 5,0 | 3,89 |
| 'Inger' | 16,0 | 3,0±0,11 | 1,335 | 16,0 | 8,0 | 4,61 |
| 'Tordis' | 8,4 | 2,1±0,14 | 0,495 | 5,9 | 3,0 | 1,38 |

Отримані результати свідчать, що після тривалого вирощування без зрізування досліджувані сорти істотно відрізнялися за біометричними показниками. Водночас зниження інтенсивності приросту у старших насадженнях вказує на необхідність періодичного омолодження плантацій шляхом зрізування надземної частини.

Через два роки після попереднього обліку, коли надземна частина досліджуваних рослин досягла трирічного віку, ранньою весною 2024 року, до початку сокоруху, її було зрізано та визначено біометричні показники трирічної біомаси. Встановлено, що рослини, сформовані протягом 2021–2023 рр., характеризувалися достатньо високими показниками росту і розвитку, зокрема за висотою, довжиною пагонів, їх діаметром, кількістю та масою.

Середня висота кущів змінювалася від 409,3 см у сорту 'Tordis' до 517,3 см у сорту '1052'. Високими показниками висоти рослин також характеризувалися сорти '1047' – 470,0 см, 'Wilhelm' – 444,5 см, 'Inger' – 442,0 см та '082' – 440,5 см. Отже, найінтенсивніший ріст за висотою впродовж трирічного циклу відростання спостерігався у сорту '1052', тоді як найменшу висоту кущів сформував сорт 'Tordis'.

Середня довжина пагонів у досліджуваних культиварів становила від 321,8 см у сорту 'Inger' до 376,9 см у сорту 'Wilhelm'. Високими значеннями цього показника відзначалися також сорти '1052' – 365,3 см та '1047' – 352,4 см. Це свідчить про те, що окремі сорти, навіть за близьких показників висоти рослин, можуть відрізнятися за архітектонікою куща та характером формування пагонів (рис. 4.5.1).

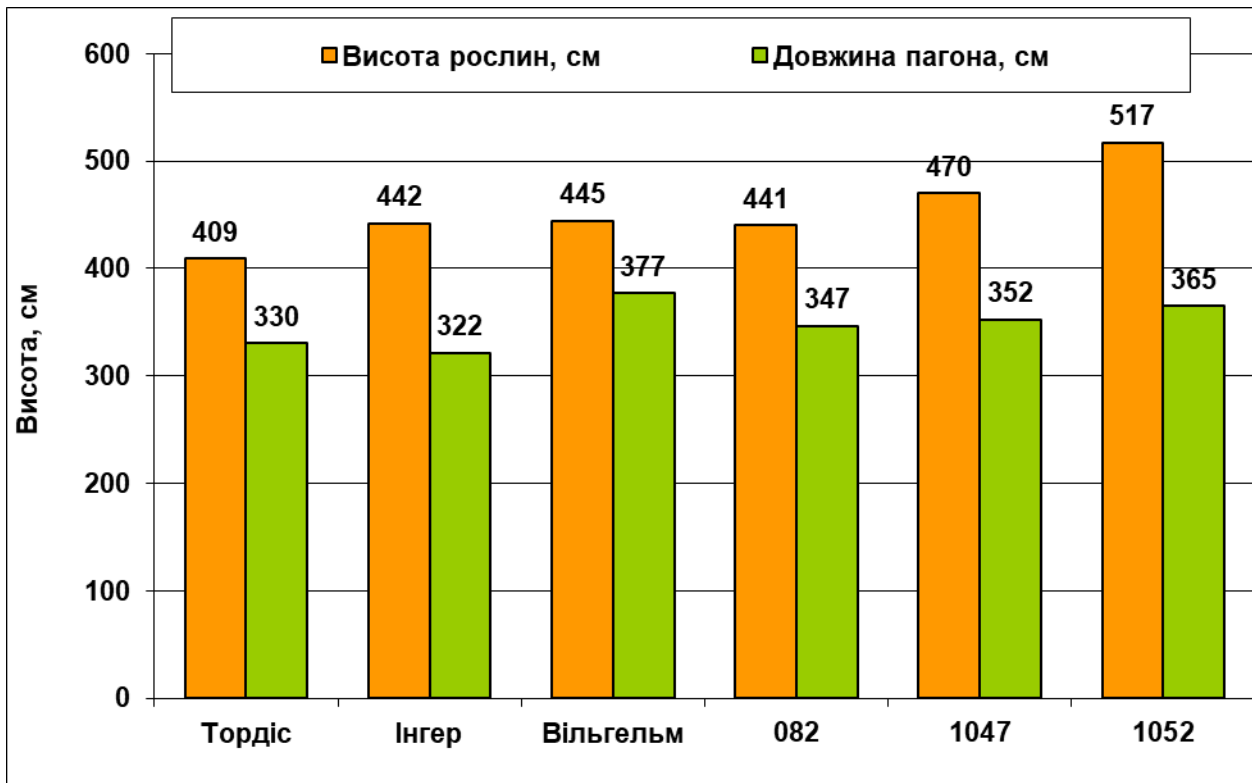


Рис. 4.5.1. Середня висота трирічних рослин та середня довжина пагонів досліджуваних культиварів верби прутовидної

Дослідження товщини пагонів показало, що найбільший середній діаметр біля основи пагона мали рослини сорту ‘Wilhelm’ – 21,4 мм, тоді як найменший показник – 15,4 мм – встановлено у клону ‘082’. У середній частині пагонів найбільший діаметр також був у сорту ‘Wilhelm’ – 12,3 мм. Мінімальні значення цього показника, по 10,3 мм, відзначено у сортів ‘Tordis’ та ‘082’. Таким чином, сорт ‘Wilhelm’ формував найпотужніші пагони за товщиною, що є важливою передумовою високої маси окремого пагона та загальної продуктивності біомаси (рис. 4.5.2).

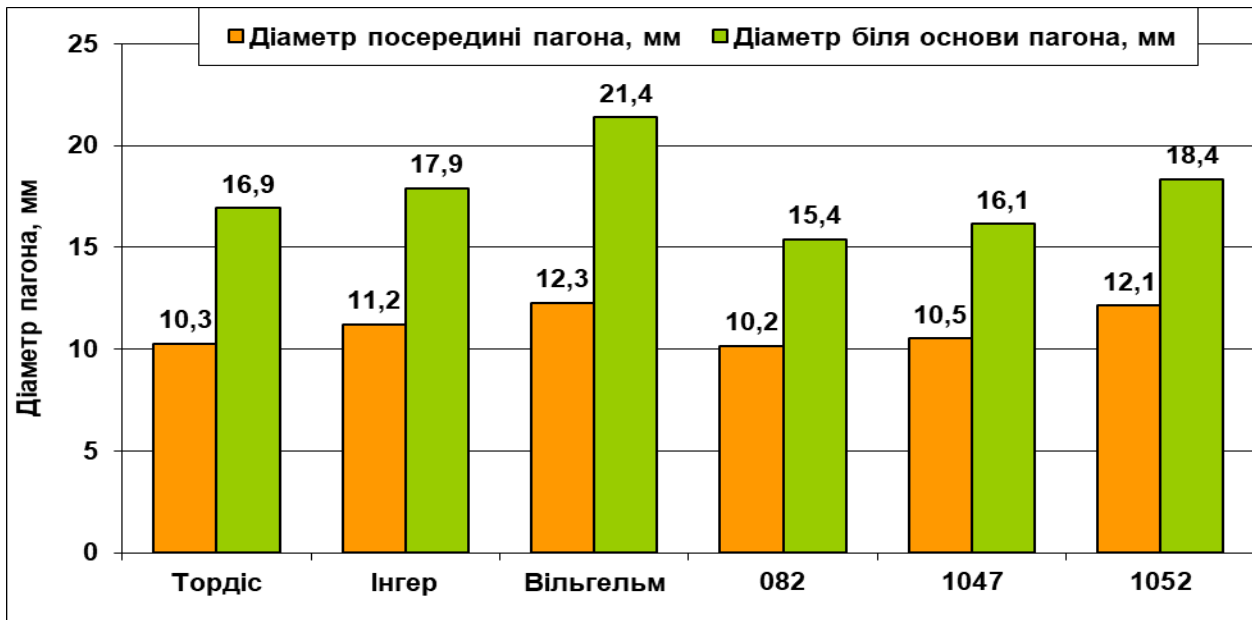


Рис. 4.5.2. Середній діаметр пагонів досліджуваних культиварів верби прутovidної біля основи та посередині їх висоти

Аналіз кількості пагонів на одній рослині показав, що куцистість сортів істотно відрізнялася. У середньому на одному куці формувалося від 4,5 пагонів у сорту ‘Wilhelm’ до 12,8 пагонів у сорту ‘1052’. Високою куцистістю відзначалися також сорти ‘1047’ – 12,5 пагонів та ‘082’ – 11,5 пагонів на куці. Сорт ‘Inger’ формував 9,8 пагонів, тоді як ‘Tordis’ характеризувався відносно невисоким значенням цього показника – 4,8 пагонів на куці.

Середня маса одного пагона у свіжозрізаному стані, як і показники діаметра, найбільшою була у сорту ‘Wilhelm’ і становила 503,9 г. Найменшою вона виявилася у клону ‘082’ – 307,8 г. Проте за показником сирої маси одного куці перевага належала сорту ‘1052’, у якого цей показник становив 4635,0 г, що пояснюється поєднанням високої куцистості та достатньо значної маси окремих пагонів. Високою масою одного куці відзначався також сорт ‘1047’ – 4342,5 г. Найменше значення цього показника було у сорту ‘Tordis’ – 1475,0 г, що пов’язано з меншою кількістю пагонів на рослині та нижчою масою куці загалом (рис. 4.5.3).

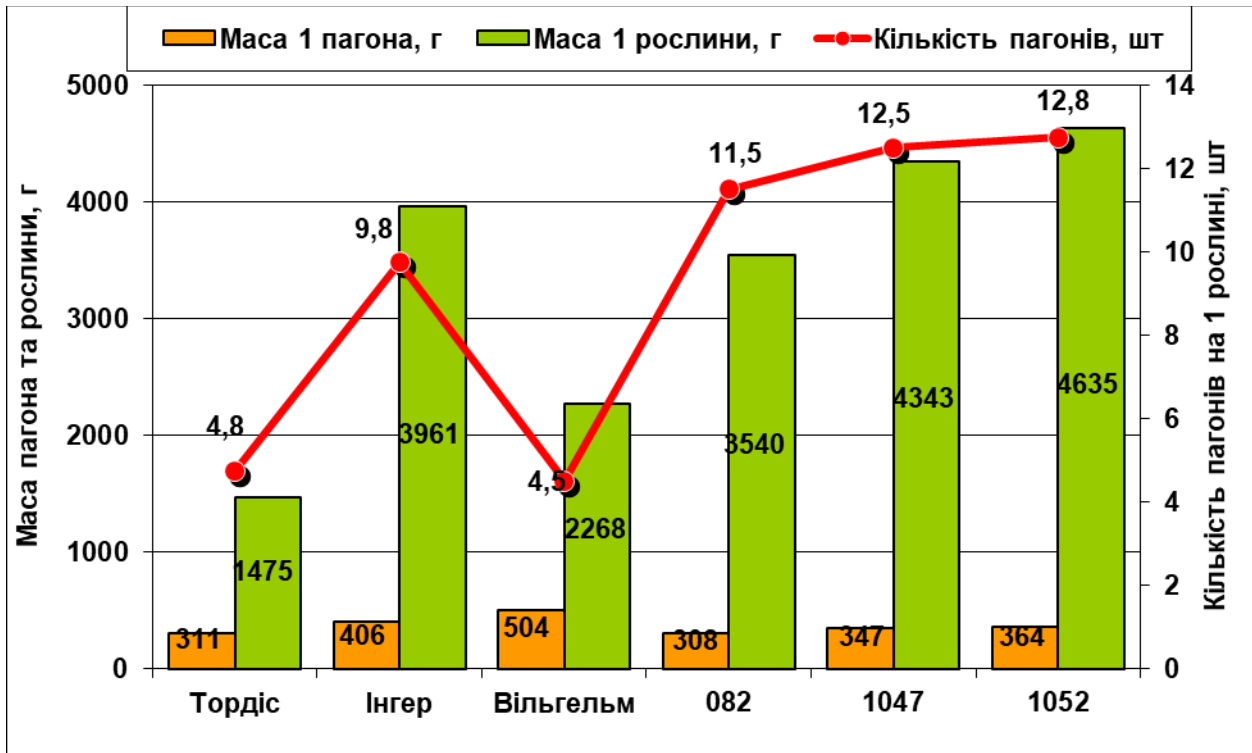


Рис. 4.5.3. Середня кількість пагонів на одній рослині та сира маса пагонів і кущів досліджуваних культиварів верби прутовидної

Отже, результати досліджень свідчать, що трирічні рослини верби прутовидної після зрізування старших насаджень характеризувалися значною сортовою мінливістю за основними біометричними показниками. Найбільшою висотою та куцистістю відзначався сорт '1052', тоді як сорт 'Wilhelm' мав найбільші показники довжини і товщини пагонів, а також маси одного пагона. Це дає підстави вважати, що продуктивність трирічної біомаси формується під впливом різних структурних елементів, а саме висоти рослин, кількості пагонів на кущ, їх діаметра та маси, співвідношення яких є сортоспецифічним

На основі показників середньої маси кущів і збереженості рослин, яка на час досліджень становила 80 %, було визначено урожайність сирої та сухої біомаси досліджуваних сортів верби прутовидної.

Аналіз даних таблиці 4.5.2 свідчить, що за трирічного циклу відростання найвищу урожайність сирої біомаси забезпечив сорт '1052', 55,62 т/га. Високі показники також мали сорти '1047', 52,11 т/га, та 'Inger', 47,54 т/га. Сорт '082' сформував 42,48 т/га сирої маси. Значно нижчою урожайність була у сортів 'Wilhelm', 27,21 т/га, та 'Tordis', 17,70 т/га.

Таблиця 4.5.2

Показники росту і продуктивності трирічної біомаси плантацій іноземних сортів верби прутовидної за густоти садіння 15,0 тис. шт./га

| Показники | Сорти | | | | | | НІР _{0,0} 5 |
|--------------------------------|--------|--------|-----------|--------|--------|--------|-------------------------|
| | Тордіс | Інгер | Вільгельм | 082 | 1047 | 1052 | |
| Висота рослин, см | 409,3 | 442,0 | 444,5 | 440,5 | 470,0 | 517,3 | 10,8 |
| Кількість пагонів, шт. | 4,8 | 9,8 | 4,5 | 11,5 | 12,5 | 12,8 | 0,8 |
| Довжина пагона, см | 330,4 | 321,8 | 376,9 | 346,7 | 352,4 | 365,3 | 5,5 |
| Діаметр посередині пагона, мм | 10,3 | 11,2 | 12,3 | 10,3 | 10,5 | 12,1 | 0,2 |
| Діаметр біля основи пагона, мм | 16,9 | 17,9 | 21,4 | 15,4 | 16,1 | 18,4 | 0,6 |
| Сира маса 1 пагона, г | 310,5 | 406,3 | 503,9 | 307,8 | 347,4 | 363,5 | 19,6 |
| Сира маса 1 рослини, г | 1475,0 | 3961,3 | 2267,5 | 3540,0 | 4342,5 | 4635,0 | 316,0 |
| Урожайність сирої маси, т/га | 17,70 | 47,54 | 27,21 | 42,48 | 52,11 | 55,62 | 3,79 |
| Урожайність сухої маси, т/га | 8,85 | 23,77 | 13,61 | 21,24 | 26,06 | 27,81 | 1,89 |

За урожайністю сухої біомаси найкращі результати отримано у сортів '1052', 27,81 т/га, та '1047', 26,06 т/га. Високий показник мав також сорт 'Inger', 23,77 т/га. Сорт '082' сформував 21,24 т/га сухої маси. Значно меншою продуктивність біомаси була у сортів 'Wilhelm', 13,61 т/га, та 'Tordis', 8,85 т/га.

Отримані результати свідчать, що продуктивність трирічної біомаси визначалася не одним окремим показником, а поєднанням кількох структурних елементів. Зокрема, сорт 'Wilhelm' мав найбільшу масу одного пагона і найвищі показники діаметра, однак через низьку кількість пагонів на одну рослину його загальна урожайність була нижчою порівняно з сортами '1052', '1047' та 'Inger'.

Натомість сорти '1052' і '1047' забезпечили найвищу продуктивність завдяки поєднанню високої кущистості, значної маси одного куща та достатньо високих біометричних показників пагонів.

Таким чином, за трирічного циклу формування біомаси найбільш перспективними для вирощування в умовах Правобережного Лісостепу України були сорти '1052', '1047' та 'Inger'. Їхня перевага зумовлена здатністю формувати високу масу одного куща, достатню кількість продуктивних пагонів і високий вихід сухої речовини з одиниці площі.

4.6. Взаємозв'язки між біометричними показниками трирічних пагонів верби прутovidної

Для поглибленої оцінки формування біомаси було проведено кореляційний аналіз взаємозв'язків між основними біометричними показниками трирічних пагонів досліджуваних сортів верби прутovidної. Особливу увагу приділено культивару 'Tordis', для якого визначено силу зв'язку між довжиною пагона, діаметром у середній частині, діаметром біля основи та масою одного пагона.

Таблиця 4.6.1.

Кореляційна матриця взаємозв'язків між біометричними показниками трирічних пагонів культивару Тордіс

| | Довжина пагона | Діаметр на 1/2 пагона | Діаметр біля основи пагона |
|----------------------------|----------------|-----------------------|----------------------------|
| Довжина пагона | 1 | | |
| Діаметр на 1/2 пагона | 0,83 | 1 | |
| Діаметр біля основи пагона | 0,90 | 0,94 | 1 |
| Маса 1 пагона | 0,82 | 0,95 | 0,96 |

За результатами кореляційного аналізу встановлено тісні позитивні зв'язки між усіма досліджуваними біометричними показниками. Найтісніший зв'язок виявлено між масою одного пагона та його діаметром біля основи, $R = 0,96$. Також дуже високою була кореляція між масою пагона і діаметром у середній частині, $R = 0,95$. Це свідчить, що діаметричні показники є найбільш

інформативними для оцінювання маси пагона і прогнозування продуктивності біомаси.

Високий зв'язок встановлено також між діаметром біля основи пагона і діаметром у середній частині, $R = 0,94$. Довжина пагона тісно корелювала з діаметром біля основи, $R = 0,90$, та дещо слабше з діаметром у середній частині, $R = 0,83$. Зв'язок між масою одного пагона і його довжиною також був високим, $R = 0,82$, однак поступався зв'язкам маси з діаметричними показниками.

Для математичного опису виявлених залежностей було проведено апроксимацію експериментальних даних методом найменших квадратів. Установлено, що залежність між довжиною пагона сорту 'Tordis' і його діаметром біля основи досить точно описується логарифмічною функцією:

$$y = 328,43 \ln(x) - 591,58,$$

де y , довжина пагона, см; x , діаметр біля основи пагона, мм. Коефіцієнт детермінації становив $R^2 = 0,87$, що підтверджує достатньо високий рівень апроксимації (рис. 4.6.1.).

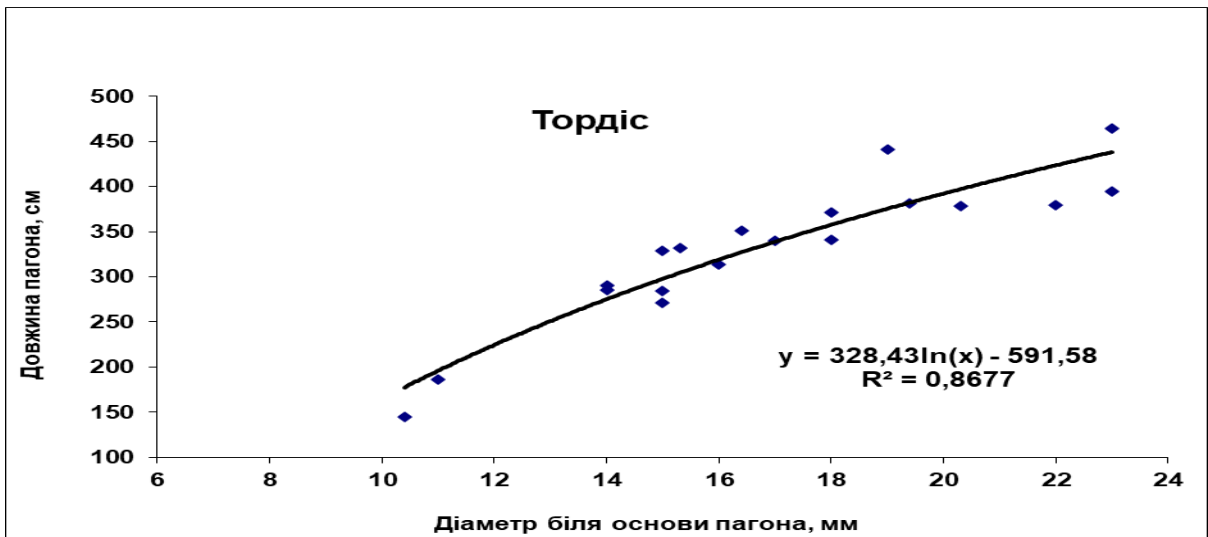


Рис. 4.6.1. Кореляційна залежність довжини пагона верби сорту 'Tordis' від його діаметра біля основи

Кореляційна залежність між довжиною пагона сорту 'Tordis' і його діаметром у середній частині також досить точно описувалася логарифмічною функцією:

$$y = 336,29 \ln(x) - 446,41.$$

Це підтверджує закономірний зв'язок між лінійним ростом пагона та його діаметричними показниками (рис.4.6.2.).

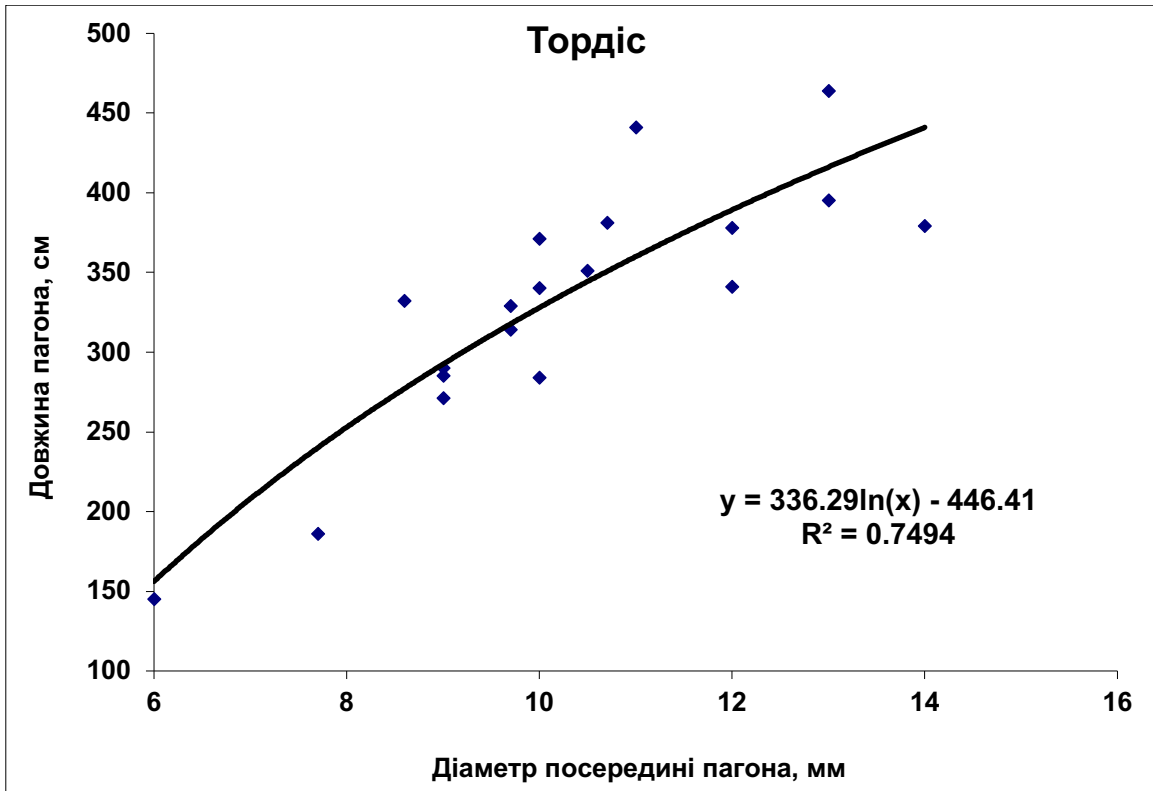


Рис. 4.6.2. Кореляційна залежність довжини пагона верби сорту 'Tordis' від його діаметра у середній частині

Залежності між масою пагона та іншими біометричними параметрами мали дещо інший характер. Вони найточніше описувалися степеневими функціями, що свідчить про нелінійний характер накопичення маси зі збільшенням діаметра або довжини пагона (рис.4.6.3.-4.6.5)

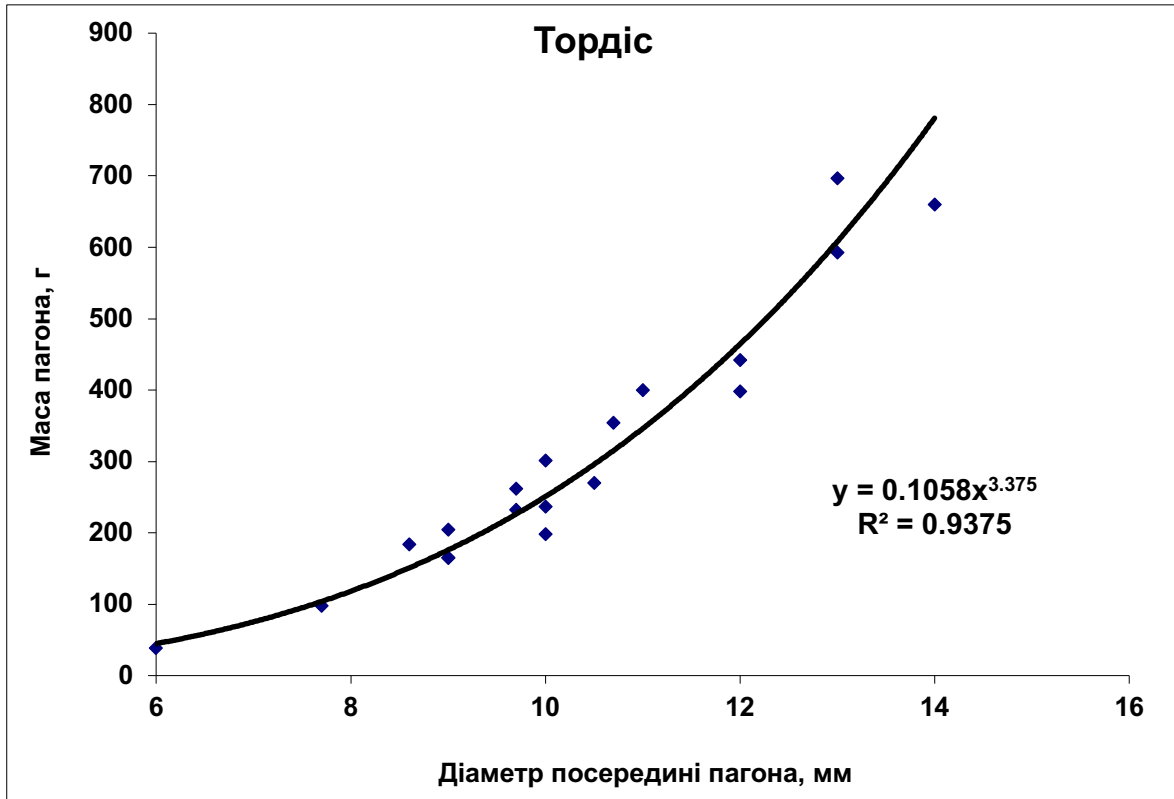


Рис. 4.6.3. Кореляційна залежність маси пагона верби сорту 'Tordis' від його діаметра посередині пагона

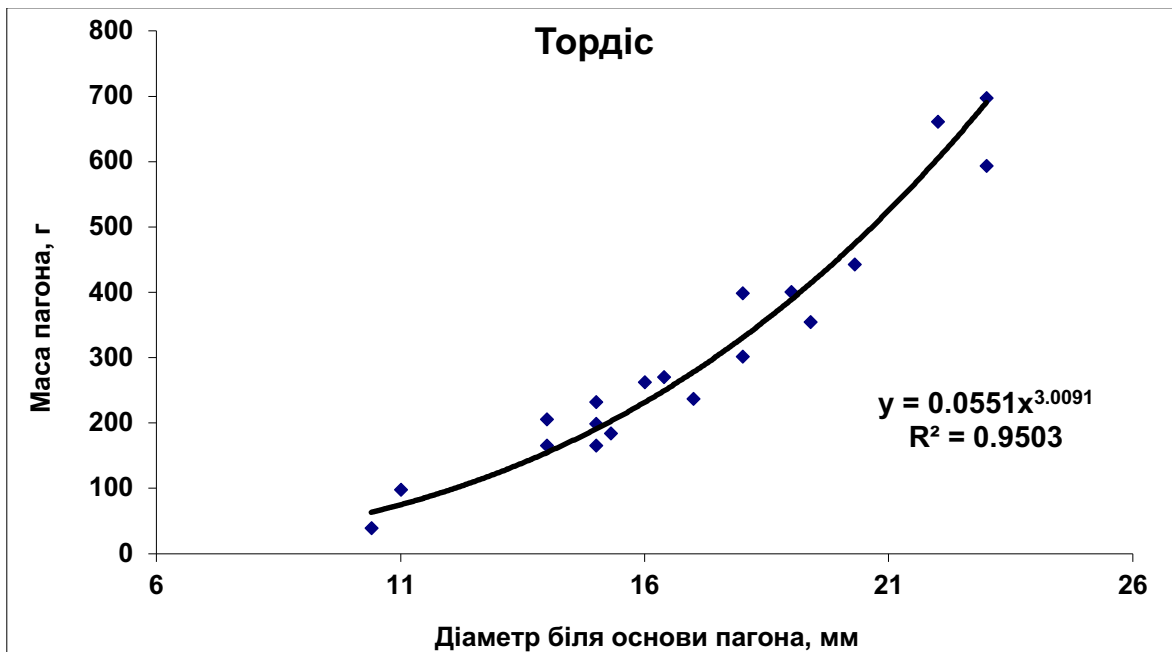


Рис. 4.6.4. Кореляційна залежність маси пагона верби сорту 'Tordis' від його діаметра біля основи пагона

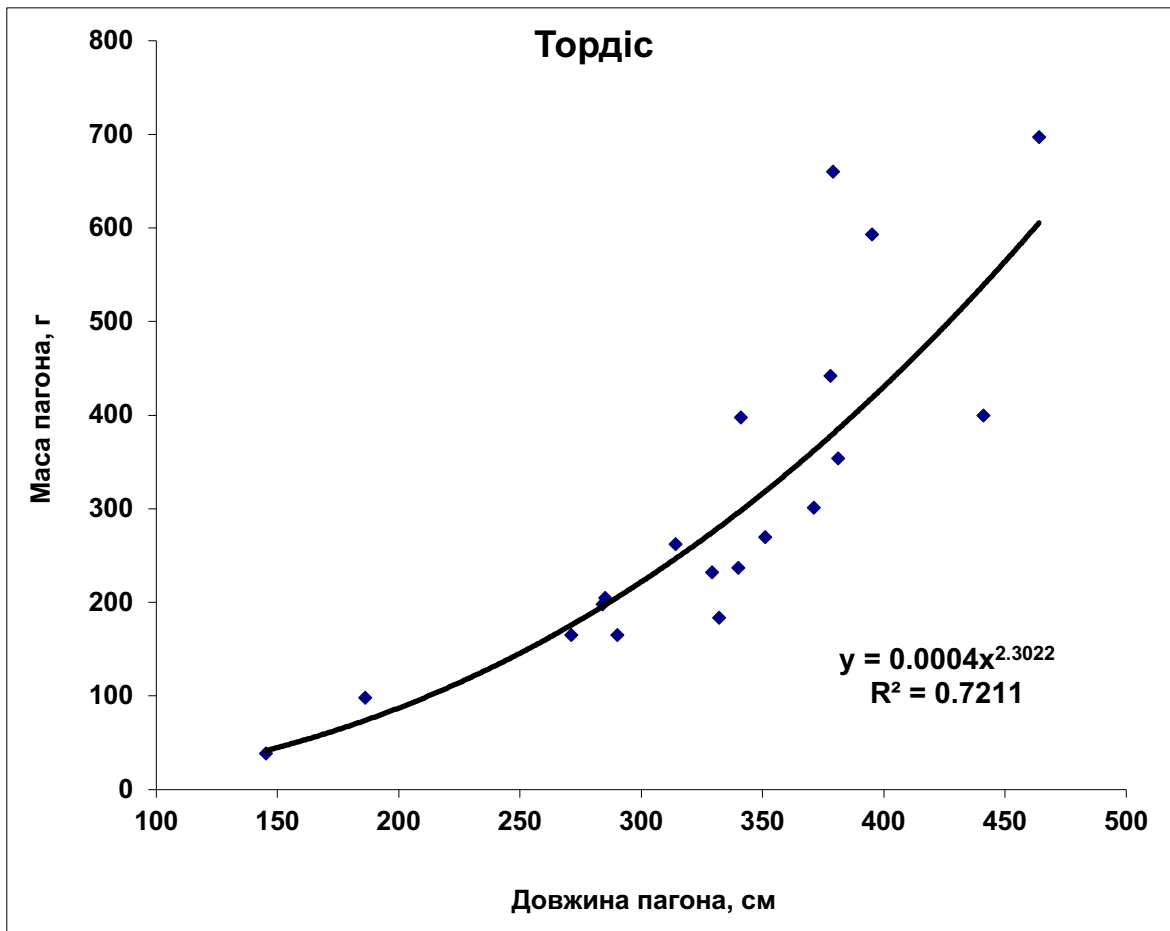


Рис. 4.6.5. Кореляційна залежність маси пагона верби сорту 'Tordis' від його довжини

Найвищий рівень апроксимації встановлено для залежності маси пагона від його діаметра посередині, $R^2 = 0,96$, та від діаметра біля основи, $R^2 = 0,92$. Це підтверджує, що саме діаметр пагона найбільшою мірою визначає його масу і може бути використаний як основний показник для експрес-оцінки продуктивності трирічної біомаси.

Взаємозв'язки між біометричними показниками трирічних пагонів інших досліджуваних сортів верби прутувидної наведено у додатках А.1-А.5. Представлені в додатках дані свідчать, що у цих сортів залежності між довжиною пагона та його діаметрами біля основи і посередині переважно описувалися лінійними функціями за високих показників апроксимації. Водночас залежності

між масою пагона та його довжиною, діаметром біля основи і діаметром у середній частині найточніше описувалися степеневими функціями.

Отже, результати кореляційного аналізу підтвердили, що формування маси трирічних пагонів верби прутovidної найбільшою мірою залежить від діаметричних показників. Найбільш інформативними є діаметр біля основи та діаметр посередині пагона. Встановлені залежності мають практичне значення для прогнозування продуктивності біомаси, добору модельних рослин і розроблення експрес-методів оцінювання врожайності енергетичних плантацій верби прутovidної.

Висновки до розділу 4. Установлено, що досліджувані сорти верби прутovidної (*Salix viminalis* L.) істотно відрізнялися між собою за інтенсивністю росту, морфометричними показниками, здатністю до відростання після зрізування та продуктивністю енергетичної біомаси. Навіть за однакової густоти садіння 15,0 тис. рослин/га та вирощування в однакових ґрунтово-кліматичних умовах Правобережного Лісостепу України сорти формували різну кількість пагонів, висоту рослин, діаметр стебел, масу одного куща та урожайність сирової і сухої біомаси.

За шестирічного циклу вирощування без проміжного зрізування найвищу урожайність сухої біомаси забезпечили сорти шведської селекції 'Inger' та 'Wilhelm', відповідно 38,10 і 31,85 т/га, що відповідало середньорічному приросту 6,35 і 5,31 т/га. Серед сортів польської селекції найкращим за продуктивністю був 'Marzencinski', який сформував 20,60 т/га сухої біомаси, або 3,43 т/га за рік. Найнижчі показники продуктивності за шестирічного циклу встановлено у сортів 'Warm-maz' і 'Tordis'.

Дослідження восьмирічних насаджень, які тривалий час зростали без зрізування надземної маси, показало зниження середньорічного приросту сухої біомаси. Найвищу урожайність у цьому віці забезпечив сорт 'Inger' – 36,90 т/га

сухої біомаси, або 4,61 т/га за рік. Високою продуктивністю характеризувався також сорт 'Wilhelm' – 31,10 т/га, або 3,89 т/га за рік. Найменший середньорічний приріст сухої біомаси був у сорту 'Gigantea' – 1,19 т/га за рік. Це свідчить про недоцільність надмірного подовження циклу вирощування без періодичного зрізування біомаси.

Установлено, що у восьмирічному віці досліджувані сорти істотно відрізнялися за висотою, діаметром і масою середніх пагонів. Найвищі біометричні показники мали сорти 'Inger' та 'Tordis'. У сорту 'Inger' висота середнього пагона становила 6,42 м, діаметр – 3,3 см, суха маса середнього пагона – 1,76 кг. У сорту 'Tordis' ці показники становили відповідно 6,25 м, 3,1 см і 1,67 кг. У решти сортів висота змінювалася від 5,90 до 6,13 м, діаметр – від 1,85 до 2,55 см, а суха маса середнього пагона – від 0,89 до 1,05 кг.

Виявлено, що продуктивність восьмирічних насаджень залежала не лише від розмірів і маси окремих пагонів, а й від збереженості рослин та кількості пагонів на один кущ. Зокрема, сорт 'Wilhelm' поєднував високу продуктивність із найкращою збереженістю рослин, тоді як сорт 'Inger', незважаючи на нижчу збереженість, забезпечував найвищу урожайність завдяки значній масі одного куща.

У всіх досліджуваних сортів зафіксовано тенденцію до суттєвого зменшення річних приростів за висотою і діаметром після досягнення рослинами віку 3–5 років, переважно після четвертого року вирощування. Це свідчить, що першу заготовлю енергетичної біомаси в умовах Правобережного Лісостепу України доцільно проводити переважно у чотирирічному віці. Надалі, після формування добре розвиненої кореневої системи, ротаційний цикл може бути скорочений до двох-трьох років.

Зрізування старших насаджень сприяло активному відростанню однорічної біомаси та значному підвищенню кущистості рослин. Кількість пагонів на один

кущ після зрізування змінювалася від 8,4 шт. у сорту 'Tordis' до 16,0 шт. у сорту 'Inger'. Найвищу урожайність сухої однорічної біомаси сформував сорт 'Inger' – 8,0 т/га/рік. Високі показники також встановлено у сортів 'Marzencinski' – 6,9 т/га/рік і 'Gigantea' – 5,5 т/га/рік, що підтверджує їхню здатність до інтенсивного відростання після зрізування.

За трирічного циклу відростання найбільш продуктивними були сорти '1052', '1047' та 'Inger'. Найвищу урожайність сухої біомаси забезпечив сорт '1052' – 27,81 т/га, дещо нижчу – '1047' – 26,06 т/га та 'Inger' – 23,77 т/га. Сорт '082' сформував 21,24 т/га сухої біомаси. Значно нижчою продуктивність була у сортів 'Wilhelm' – 13,61 т/га та 'Tordis' – 8,85 т/га. Перевага сортів '1052' і '1047' була зумовлена високою кущистістю, значною сирою масою одного куща та високим виходом біомаси з одиниці площі.

Кореляційний аналіз біометричних показників трирічних пагонів сорту 'Tordis' показав наявність тісних позитивних зв'язків між масою пагона та його діаметричними параметрами. Найтісніший зв'язок встановлено між масою одного пагона та його діаметром біля основи, $R = 0,96$, а також між масою пагона і діаметром у середній частині, $R = 0,95$. Це свідчить, що діаметр пагона є найбільш інформативним показником для прогнозування маси та продуктивності біомаси.

Математична апроксимація підтвердила, що залежності між довжиною пагона та його діаметром описуються логарифмічними функціями, тоді як залежності між масою пагона і його довжиною або діаметрами найточніше описуються степеневими функціями. Це має практичне значення для розроблення експрес-методів оцінювання продуктивності вербових плантацій без повного руйнівного обліку біомаси.

Отже, за комплексом показників росту, відростання після зрізування та продуктивності біомаси в умовах Правобережного Лісостепу України найбільш

перспективними є сорти 'Inger', 'Wilhelm', '1047' і '1052'. Сорт 'Inger' відзначався стабільно високою продуктивністю у старших насадженнях і після зрізування, 'Wilhelm' – високою збереженістю та потужністю пагонів, а сорти '1047' і '1052' – високою продуктивністю трирічної біомаси. Отримані результати підтверджують необхідність диференційованого добору сортів верби прутovidної з урахуванням циклу заготівлі, здатності до відростання та цільового напряму використання біомаси.

РОЗДІЛ 5

ЯКІСНА ХАРАКТЕРИСТИКА БІОМАСИ СОРТІВ ВЕРБИ ПРУТОВИДНОЇ ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ

Окрім урожайності біомаси, важливим критерієм оцінки енергетичних плантацій верби прутувидної є її якість, оскільки саме хімічний склад деревної сировини визначає придатність біомаси до спалювання, пелетування, брикетування або подальшої біохімічної переробки. До основних показників, які характеризують якість біомаси для енергетичного використання, належать вміст сухої речовини, зольність, частка целюлози, геміцелюлози та лігніну, а також вміст основних мінеральних елементів.

5.1. Оцінка якісного складу біомаси сортів верби прутувидної за структурними компонентами та мінеральними елементами

Проведені дослідження основних структурних компонентів біомаси досліджуваних культиварів верби прутувидної показали, що за вмістом сухої речовини, целюлози, геміцелюлози та лігніну сорти відрізнялися між собою незначно, однак за окремими показниками простежувалися певні сортові особливості (табл. 5.1.).

Таблиця 5.1

Склад біомаси досліджуваних культиварів енергетичної культури за основними структурними компонентами

| Варіант | Суха речовина, % | Попіл, % | Целюлоза, % | Геміцелюлоза, % | Лігнін, % |
|----------------------------|------------------|----------|-------------|-----------------|-----------|
| ‘1057’ (‘Marzencinski’) | 90,91 | 2,35 | 46,25 | 13,30 | 11,85 |
| ‘1047’ (‘Gigantea’) | 91,05 | 2,15 | 45,15 | 15,10 | 12,55 |
| ‘082’ | 90,97 | 3,70 | 49,03 | 14,50 | 12,80 |

| | | | | | |
|--------------------|-------|------|-------|-------|-------|
| ('Warm-maz') | | | | | |
| 'Inger' | 91,02 | 1,15 | 47,30 | 13,70 | 11,40 |
| 'Tordis' | 91,20 | 3,75 | 46,95 | 14,45 | 12,90 |
| 'Wilhelm' | 91,40 | 2,65 | 45,80 | 13,35 | 10,90 |
| HP _{0,05} | 0,21 | 0,24 | 1,15 | 0,56 | 0,48 |

Вміст сухої речовини у повітряно-сухій біомасі досліджуваних сортів був дуже близьким і змінювався в межах 90,91–91,40 %. Найвищий показник встановлено у сорту 'Wilhelm', 91,40 %, а найнижчий у сорту '1057' ('Marzencinski'), 90,91 %. Незначна амплітуда коливань свідчить про близький рівень повітряно-сухого стану біомаси усіх досліджуваних культиварів.

Вміст попелу варіював у ширших межах, від 1,15 до 3,75 %. Найнижчу зольність мала біомаса сорту 'Inger', 1,15 %, що є позитивною ознакою для термічного використання, оскільки низький вміст мінеральних домішок зменшує утворення золи, шлаків і відкладень у теплотехнічному обладнанні. Найвищу зольність відмічено у сорту 'Tordis', 3,75 %, та клону '082' ('Warm-maz'), 3,70 %. Підвищений вміст золи може дещо обмежувати ефективність прямого спалювання, особливо за використання біомаси у котлах із підвищеними вимогами до якості палива.

Целюлоза є одним з основних структурних компонентів деревної біомаси і визначає її енергетичну цінність та потенціал для біоконверсії. Найвищий вміст целюлози зафіксовано у біомасі клону '082' ('Warm-maz'), 49,03 %. Високий показник мав також сорт 'Inger', 47,30 %. У решти варіантів вміст целюлози становив 45,15–46,95 %, що також підтверджує придатність їхньої біомаси для енергетичного використання.

Вміст геміцелюлози змінювався від 13,30 до 15,10 %. Найвищий показник встановлено у сорту '1047' ('Gigantea'), 15,10 %, а найнижчий у сорту '1057' ('Marzencinski'), 13,30 %. Підвищений вміст геміцелюлози може мати значення

для біохімічної переробки біомаси, оскільки цей компонент легше піддається гідролізу порівняно з целюлозою та лігніном.

Вміст лігніну у біомасі досліджуваних сортів становив 10,90–12,90 %. Найвищим цей показник був у сорту ‘Tordis’, 12,90 %, та клону ‘082’ (‘Warm-maz’), 12,80 %. Найнижчий вміст лігніну мав сорт ‘Wilhelm’, 10,90 %. Лігнін є важливим компонентом, що підвищує теплотворну здатність біомаси під час спалювання, проте його підвищений вміст може ускладнювати біохімічну переробку сировини.

Загалом біомаса усіх досліджуваних сортів характеризувалася високим вмістом сухої речовини та значною часткою структурних вуглеводів, передусім целюлози та геміцелюлози. Клон ‘082’ (‘Warm-maz’) відзначався найвищим вмістом целюлози, сорт ‘1047’ (‘Gigantea’) найбільшим вмістом геміцелюлози, сорт ‘Tordis’ найвищим вмістом лігніну, а сорт ‘Inger’ найнижчою зольністю. Це свідчить, що кожен із досліджуваних культиварів має певні якісні переваги залежно від напрямку використання біомаси.

Проведений аналіз мінерального складу біомаси за вмістом основних макроелементів, а саме азоту, фосфору і калію, а також потенційно проблемних домішок, зокрема хлору і сірки, показав невисоку варіабельність між досліджуваними культиварами (табл.5.2.).

Таблиця 5.2

| Варіант | N, % | P, % | K, % | Хлор, % | Сірка, % |
|----------------------------|---------|---------|---------|------------|-------------|
| ‘1057’ (‘Marzencinski’) | 1,24 | 0,63 | 1,74 | 0,015 | 0,08 |
| ‘1047’ (‘Gigantea’) | 1,23 | 0,65 | 1,73 | 0,015 | 0,08 |
| ‘082’ (‘Warm-maz’) | 1,23 | 0,65 | 1,75 | 0,017 | 0,10 |
| ‘Inger’ | 1,23 | 0,60 | 1,73 | 0,016 | 0,08 |
| ‘Tordis’ | 1,26 | 0,70 | 1,76 | 0,017 | 0,09 |

| | | | | | |
|---------------------|------|------|------|--------|------|
| ‘Wilhelm’ | 1,25 | 0,65 | 1,75 | 0,016 | 0,08 |
| НІР _{0,05} | 0,03 | 0,04 | 0,03 | 0,0015 | 0,01 |

**Вміст основних макроелементів, хлору і сірки у біомасі досліджуваних
культиварів верби**

Вміст азоту в біомасі досліджуваних сортів був досить стабільним і коливався в межах 1,23–1,26 %. Найвищий показник встановлено у сорту ‘Tordis’, 1,26 %, дещо нижчий у сорту ‘Wilhelm’, 1,25 %, та у сорту ‘1057’ (‘Marzencinski’), 1,24 %. У сортів ‘1047’ (‘Gigantea’), ‘082’ (‘Warm-maz’) та ‘Inger’ вміст азоту становив 1,23 %. Підвищений вміст азоту в біомасі може впливати на утворення оксидів азоту під час спалювання, однак відмінності між сортами були незначними.

Вміст фосфору змінювався в межах 0,60–0,70 %. Найменший його вміст встановлено у сорту ‘Inger’, 0,60 %, а найбільший у сорту ‘Tordis’, 0,70 %. У сортів ‘1047’ (‘Gigantea’), ‘082’ (‘Warm-maz’) та ‘Wilhelm’ цей показник становив 0,65 %, а у ‘1057’ (‘Marzencinski’) 0,63 %. Фосфор може впливати на процеси золотворення, однак водночас є важливим елементом, який визначає агрохімічну цінність зольних залишків.

Вміст калію у всіх варіантах був відносно високим і становив 1,73–1,76 %. Максимальний показник зафіксовано у сорту ‘Tordis’, 1,76 %. Дещо нижчі значення мали ‘082’ (‘Warm-maz’) і ‘Wilhelm’, по 1,75 %. У сорту ‘1057’ (‘Marzencinski’) вміст калію становив 1,74 %, а у ‘1047’ (‘Gigantea’) та ‘Inger’ 1,73 %. Підвищений вміст калію може сприяти шлакуванню та утворенню відкладень у процесі спалювання, тому цей показник є важливим для оцінки технологічної придатності біомаси.

Хлор містився у дуже низьких концентраціях, 0,015–0,017 %. Найменший його вміст встановлено у сортів ‘1057’ (‘Marzencinski’) та ‘1047’ (‘Gigantea’), по 0,015 %. Найвищі значення мали ‘082’ (‘Warm-maz’) і ‘Tordis’, по 0,017 %. Незважаючи на низький абсолютний вміст, хлор є важливим показником якості

твердого біопалива, оскільки його підвищена концентрація може посилювати корозійні процеси у теплотехнічному обладнанні.

Вміст сірки змінювався від 0,08 до 0,10 %. Найвищий показник встановлено у клону '082' ('Warm-maz'), 0,10 %, а дещо нижчий у сорту 'Tordis', 0,09 %. У решти сортів вміст сірки становив 0,08 %. Підвищений вміст сірки може бути небажаним через можливе утворення оксидів сірки під час спалювання, однак загалом показники були низькими.

Узагальнюючи результати аналізу мінерального складу, можна зазначити, що всі досліджувані сорти характеризувалися відносно однорідним вмістом макроелементів, хлору і сірки. Сорт 'Tordis' вирізнявся дещо вищим вмістом азоту, фосфору, калію та хлору, а клон '082' ('Warm-maz') найвищим вмістом сірки. Сорти '1057' ('Marzencinski') і '1047' ('Gigantea') мали найнижчий вміст хлору, що є позитивною ознакою з погляду зменшення ризику корозії обладнання. Загалом біомаса усіх досліджуваних культиварів може розглядатися як придатна для енергетичного використання, однак вибір сорту має враховувати не лише урожайність, а й технологічні та екологічні характеристики сировини.

Для комплексного оцінювання подібності сортів за якісними показниками біомаси було проведено кластерний аналіз за сукупністю структурних компонентів і мінерального складу (рис.5.1.).

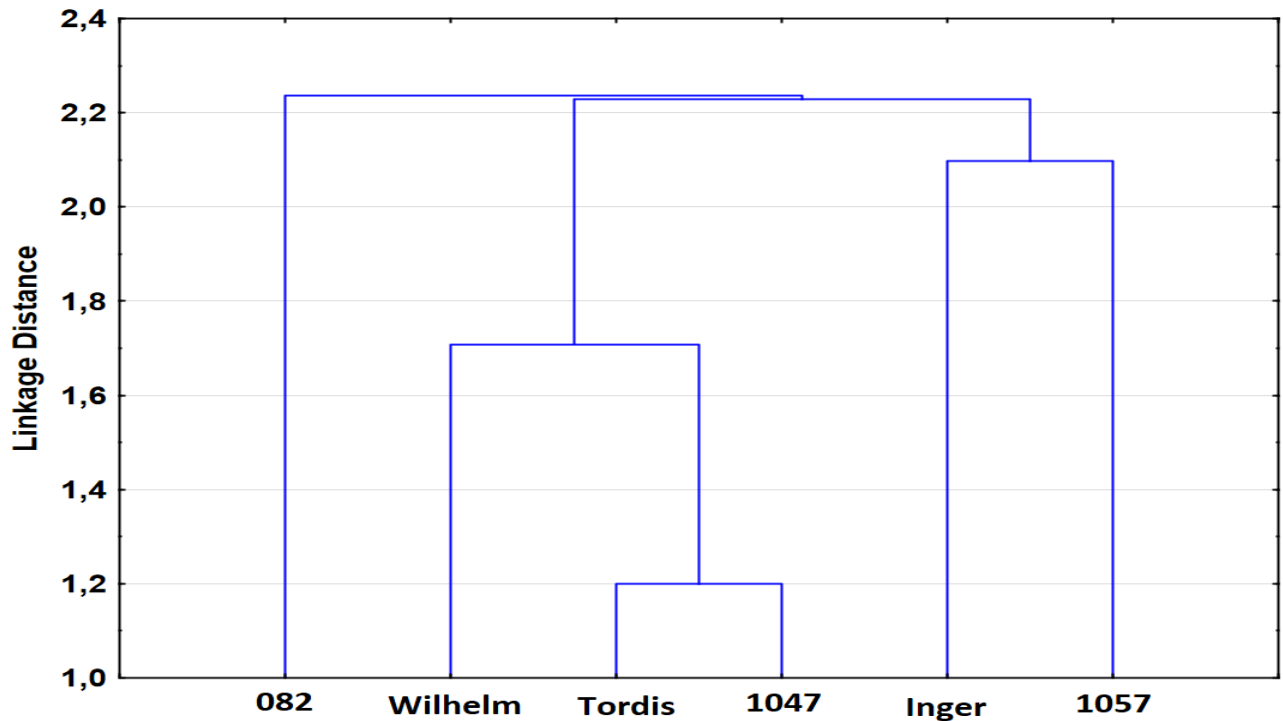


Рис. 5.1. Дендрограма кластеризації біомаси сортів верби прутовидної за основними структурними компонентами та мінеральним складом

Дендрограма відображає групування сортів верби прутовидної за досліджуваними показниками при відносно невеликих значеннях відстані зв'язку, що свідчить про загальну близькість усіх варіантів за якісним складом біомаси. На найнижчому рівні, близько 1,2, сформувався найбільш тісний кластер між сортами 'Tordis' і '1047' ('Gigantea'), що свідчить про їхню найбільшу подібність за сукупністю структурних і мінеральних показників.

На рівні відстані близько 1,7 до цього кластера приєднався сорт 'Wilhelm'. Таким чином, утворилася група з трьох сортів, 'Tordis', '1047' ('Gigantea') і 'Wilhelm', які характеризувалися високим ступенем подібності за якісними показниками біомаси. Далі до цієї групи на вищому рівні відстані, близько 2,2, приєднався клон '082' ('Warm-maz'), що свідчить про його дещо більшу відмінність, однак загалом він залишався близьким до основного кластера.

Окрему гілку сформували сорти 'Inger' і '1057' ('Marzencinski'), які об'єдналися між собою на рівні близько 2,1. Це вказує на їхню взаємну

подібність, але водночас певну відмінність від групи ‘Tordis’, ‘1047’, ‘Wilhelm’ і ‘082’. На найвищому рівні дендрограми відбулося злиття двох основних кластерів: першого, до якого увійшли ‘Tordis’, ‘1047’, ‘Wilhelm’ і ‘082’, та другого, представленого сортами ‘Inger’ і ‘1057’.

Отже, структура дендрограми дала змогу виділити дві основні групи сортів за якісними показниками біомаси. Перша група була більш чисельною і включала ‘Tordis’, ‘1047’, ‘Wilhelm’ та ‘082’, які характеризувалися близькими структурними й мінеральними параметрами. Друга група об’єднала ‘Inger’ і ‘1057’, що свідчить про їхню відносну відокремленість за сукупністю досліджуваних ознак. Найбільш подібними між собою були ‘Tordis’ і ‘1047’, тоді як найбільш відокремленою групою були ‘Inger’ і ‘1057’.

5.2. Енергетична цінність біомаси сортів верби прутовидної

Енергетична цінність біомаси верби прутовидної є важливим інтегральним показником, який поєднує урожайність сухої речовини, її хімічний склад і потенційну здатність до використання як твердого біопалива. Для енергетичних культур важливою є не лише кількість сформованої біомаси, а й вихід енергії з одиниці площі, оскільки саме цей показник визначає практичну доцільність створення плантацій для виробництва деревної тріски, пелет, брикетів або використання сировини у локальних системах теплопостачання.

У досліджуваних сортів верби прутовидної вміст сухої речовини у повітряно-сухій біомасі був високим і становив 90,91–91,40 %, що свідчить про придатність сировини до енергетичного використання. Висока частка целюлози, геміцелюлози та лігніну забезпечує достатній енергетичний потенціал деревної біомаси, а відносно низький вміст хлору і сірки зменшує ризики корозії обладнання та утворення небажаних викидів під час спалювання.

Для оцінки енергетичного виходу біомаси було використано розрахунковий підхід, за якого енергетичну продуктивність визначали як

добуток урожайності сухої біомаси на умовну теплотворну здатність 16,0 ГДж/т сухої речовини. Такий підхід дає змогу порівняти досліджувані сорти за потенційним виходом енергії з одиниці площі (табл. 5.2. 1).

Таблиця 5.2.1

**Розрахунковий вихід енергії з трирічної сухої біомаси сортів верби
прутовидної**

| Сорт | Урожайність сухої біомаси, т/га | Вихід енергії, ГДж/га | Середньорічний вихід енергії, ГДж/га/рік |
|---------------------|------------------------------------|--------------------------|---|
| ‘Tordis’ | 8,85 | 141,6 | 47,2 |
| ‘Inger’ | 23,77 | 380,3 | 126,8 |
| ‘Wilhelm’ | 13,61 | 217,8 | 72,6 |
| ‘082’ (‘Warm-maz’) | 21,24 | 339,8 | 113,3 |
| ‘1047’ (‘Gigantea’) | 26,06 | 417,0 | 139,0 |
| ‘1052’ | 27,81 | 445,0 | 148,3 |

Найвищий розрахунковий вихід енергії з трирічної біомаси забезпечив сорт ‘1052’ – 445,0 ГДж/га, або 148,3 ГДж/га/рік. Дещо нижчий, але також високий показник встановлено у сорту ‘1047’ (‘Gigantea’) – 417,0 ГДж/га, або 139,0 ГДж/га/рік. Високою енергетичною продуктивністю характеризувався також сорт ‘Inger’, який забезпечив 380,3 ГДж/га, або 126,8 ГДж/га/рік.

Клон ‘082’ (‘Warm-maz’) мав урожайність сухої біомаси 21,24 т/га, що відповідало виходу енергії 339,8 ГДж/га, або 113,3 ГДж/га/рік. Сорт ‘Wilhelm’ забезпечив 217,8 ГДж/га енергії, або 72,6 ГДж/га/рік. Найнижчий розрахунковий вихід енергії мав сорт ‘Tordis’ – 141,6 ГДж/га, або 47,2 ГДж/га/рік, що зумовлено найменшою урожайністю сухої біомаси за трирічний цикл.

Отже, за енергетичною продуктивністю трирічної біомаси найбільш перспективними були сорти ‘1052’, ‘1047’ (‘Gigantea’) та ‘Inger’. Їхня перевага пов’язана насамперед із високою урожайністю сухої речовини, оскільки хімічний склад біомаси досліджуваних сортів відрізнявся незначно. Це свідчить, що в

умовах Правобережного Лісостепу України головним чинником формування енергетичного виходу з одиниці площі була саме продуктивність сухої біомаси.

Для порівняння енергетичної ефективності довших циклів вирощування було також розраховано вихід енергії для шестирічних і восьмирічних насаджень. За шестирічного циклу найвищий середньорічний вихід енергії забезпечували сорти 'Inger' та 'Wilhelm', відповідно 101,6 і 85,0 ГДж/га/рік. Серед сортів польської селекції найвищим показником характеризувався 'Marzencinski' – 54,9 ГДж/га/рік.

У восьмирічному віці середньорічний вихід енергії зменшувався, що підтверджує недоцільність надмірного подовження циклу вирощування без зрізування. Найвищі показники у цьому віці залишалися у сортів 'Inger' – 73,8 ГДж/га/рік та 'Wilhelm' – 62,2 ГДж/га/рік. Водночас у сортів 'Gigantea' і 'Tordis' середньорічний вихід енергії був значно нижчим, відповідно 19,0 і 22,1 ГДж/га/рік.

Таким чином, енергетична оцінка підтвердила, що найбільш ефективним є вирощування сортів верби прутovidної у коротших ротаційних циклах, коли рослини підтримують високі темпи приросту сухої біомаси. Надмірне подовження періоду вирощування до восьми років призводить до зниження середньорічного енергетичного виходу, що пов'язано зі сповільненням ростових процесів, зменшенням приростів за висотою і діаметром, пошкодженням пагонів та частковим відмиранням рослин.

За комплексом показників урожайності, якості біомаси та розрахункового виходу енергії найбільш перспективними для енергетичного використання в умовах Правобережного Лісостепу України є сорти '1052', '1047' ('Gigantea') та 'Inger'. Сорти '1052' і '1047' забезпечували найвищий вихід енергії за трирічного циклу, тоді як 'Inger' характеризувався стабільно високою продуктивністю як у трирічному, так і у довших циклах вирощування. Це дає підстави рекомендувати

їх для створення енергетичних плантацій, орієнтованих на виробництво твердого біопалива.

5.3. Комплексна оцінка перспективності сортів для створення енергетичних плантацій

Комплексна оцінка перспективності сортів верби прутівидної для створення енергетичних плантацій має ґрунтуватися не лише на показниках урожайності біомаси, а й на сукупності морфометричних, фізіологічних, якісних та енергетичних характеристик. Важливими критеріями є інтенсивність росту пагонів, кущистість, збереженість рослин, здатність до відростання після зрізування, урожайність сухої біомаси, вміст основних структурних компонентів, зольність, мінеральний склад і розрахунковий вихід енергії з одиниці площі.

Результати проведених досліджень показали, що досліджувані сорти істотно відрізнялися за продуктивністю залежно від віку насаджень і тривалості циклу заготівлі. У старших, шестирічних і восьмирічних насадженнях найвищу продуктивність формували сорти 'Inger' і 'Wilhelm'. Зокрема, за шестирічного циклу вирощування сорт 'Inger' забезпечив 38,10 т/га сухої біомаси, а 'Wilhelm' – 31,85 т/га. У восьмирічному віці ці сорти також зберігали перевагу: урожайність сухої біомаси становила відповідно 36,90 і 31,10 т/га. Це свідчить про їхню високу здатність до накопичення деревної маси навіть за подовженого періоду вирощування.

Водночас аналіз середньорічного приросту показав, що надмірне подовження циклу вирощування без зрізування є недоцільним. У восьмирічному віці у всіх досліджуваних сортів спостерігалось зниження інтенсивності приросту за висотою і діаметром, а також погіршення фітосанітарного стану окремих рослин. Це підтверджує доцільність періодичного зрізування надземної частини як заходу омолодження плантацій і підтримання стабільної продуктивності.

Після зрізування старших насаджень рослини активно відростали, формуючи значну кількість нових пагонів. Найвищу урожайність сухої однорічної біомаси забезпечив сорт 'Inger' – 8,0 т/га/рік. Високими показниками характеризувалися також сорти 'Marzencinski' — 6,9 т/га/рік та 'Gigantea' – 5,5 т/га/рік. Це свідчить, що ці культивари мають добру регенераційну здатність і можуть ефективно використовуватися у короткоротаційних циклах після формування розвиненої кореневої системи.

За трирічного циклу формування біомаси найвищу урожайність сухої речовини забезпечили сорти '1052', '1047' та 'Inger'. Урожайність сухої біомаси у сорту '1057' становила 27,81 т/га, у '1047' – 26,06 т/га, а у 'Inger' – 23,77 т/га. Сорт '082' також мав достатньо високий показник – 21,24 т/га. Отже, для короткоротаційного вирощування особливо перспективними є сорти, здатні поєднувати високу кустистість, значну масу одного куща та стабільне формування сухої біомаси.

За якісними показниками біомаси всі досліджувані культивари характеризувалися високим вмістом сухої речовини у повітряно-сухому стані, який становив 90,91–91,40 %. Це підтверджує придатність їхньої біомаси для енергетичного використання. За вмістом целюлози перевагу мав клон '082' ('Warm-maz') – 49,03 %, що свідчить про високий потенціал його біомаси як лігноцелюлозної сировини. Сорт '1047' ('Gigantea') характеризувався найвищим вмістом геміцелюлози – 15,10 %, а сорт 'Tordis' – найвищим вмістом лігніну — 12,90 %. Найнижчу зольність мав сорт 'Inger' – 1,15 %, що є важливою позитивною ознакою для прямого спалювання.

Мінеральний склад біомаси досліджуваних сортів був відносно однорідним, однак окремі відмінності мають технологічне значення. Найнижчий вміст хлору встановлено у сортів '1057' ('Marzencinski') та '1047' ('Gigantea') – по 0,015 %, що є позитивним з погляду зменшення ризику корозії

теплотехнічного обладнання. Найвищий вміст сірки мав клон '082' ('Warm-maz') – 0,10 %, тоді як у більшості інших сортів цей показник становив 0,08 %. Загалом вміст хлору і сірки був низьким, тому біомасу всіх досліджуваних сортів можна розглядати як придатну для енергетичного використання.

Енергетична оцінка показала, що найбільший розрахунковий вихід енергії з трирічної сухої біомаси забезпечили сорти '1057', '1047' ('Gigantea') та 'Inger'. Сорт '1052' забезпечив 445,0 ГДж/га, або 148,3 ГДж/га/рік, '1047' – 417,0 ГДж/га, або 139,0 ГДж/га/рік, а 'Inger' – 380,3 ГДж/га, або 126,8 ГДж/га/рік. Перевага цих сортів була зумовлена насамперед високою урожайністю сухої біомаси, оскільки якісні показники деревної сировини між сортами відрізнялися меншою мірою.

Кластерний аналіз якісних показників біомаси підтвердив загальну близькість досліджуваних сортів за структурним і мінеральним складом, проте дав змогу виділити окремі групи культиварів. Найбільш подібними за якісними показниками були 'Tordis' і '1047' ('Gigantea'). До них наближалися 'Wilhelm' і '082' ('Warm-maz'). Окрему групу сформували 'Inger' і '1057' ('Marzencinski'), що свідчить про їхню відносну відокремленість за сукупністю досліджуваних ознак.

З огляду на комплекс показників, сорт 'Inger' можна вважати одним із найбільш універсальних культиварів для створення енергетичних плантацій. Він поєднував високу продуктивність у шестирічних і восьмирічних насадженнях, активне відростання після зрізування, високий вихід сухої біомаси та низьку зольність. Сорт 'Wilhelm' характеризувався високою збереженістю рослин, потужними пагонами та значною продуктивністю у старших насадженнях, що робить його перспективним для довгих циклів вирощування.

Сорти '1047' ('Gigantea') і '1057' були найбільш перспективними за трирічного циклу заготівлі біомаси. Їхня перевага полягала у високій кущистості, значній масі одного куща, високій урожайності сухої речовини та найбільшому

розрахунковому виході енергії з одиниці площі. Сорт '1057' ('Marzencinski') характеризувався стабільними якісними показниками біомаси, низьким вмістом хлору та добрим потенціалом для енергетичного використання. Клон '082' ('Warm-maz') мав високий вміст целюлози та достатню продуктивність трирічної біомаси, однак підвищений вміст золи і сірки потребує врахування під час вибору напряму використання його біомаси (рис. 5.3.1.).



Рис. 5.3.1. Комплексна оцінка перспективності сортів для створення енергетичних плантацій

Таким чином, комплексна оцінка показала, що для умов Правобережного Лісостепу України найбільш перспективними для створення енергетичних плантацій верби прутовидної є сорти 'Inger', '1047' ('Gigantea'), '1052' та

‘Wilhelm’. Сорт ‘Inger’ доцільно розглядати як універсальний культивар із високою продуктивністю та доброю якістю біомаси. Сорти ‘1047’ і ‘1052’ є найбільш ефективними для короткоротаційного вирощування з трирічним циклом заготівлі. Сорт ‘Wilhelm’ перспективний завдяки високій збереженості рослин і формуванню потужних пагонів. Остаточний вибір сорту для виробничого використання має здійснюватися з урахуванням цільового напрямку використання біомаси, тривалості ротаційного циклу, вимог до якості палива та умов конкретного господарства.

5.4. Економічна та енергетична ефективність вирощування перспективних сортів верби прутovidної

Економічна та енергетична ефективність вирощування верби прутovidної є важливим узагальнюючим критерієм оцінювання перспективності сортів для створення енергетичних плантацій. На відміну від традиційних сільськогосподарських культур, ефективність вирощування енергетичної верби визначається не лише рівнем урожайності біомаси, а й її енергетичною цінністю, тривалістю продуктивного використання плантації, витратами на створення й експлуатацію насаджень, а також здатністю сорту забезпечувати стабільний вихід сухої речовини з одиниці площі.

У дисертаційній роботі об’єктом дослідження є процеси росту і формування продуктивності енергетичних плантацій верби залежно від сортових особливостей, технології вирощування та циклічності заготівлі біомаси, а предметом дослідження – сорти верби прутovidної ‘Tordis’, ‘Inger’, ‘Wilhelm’, ‘082’, ‘1047’ і ‘1057’, показники продуктивності, якості біомаси та економічна й енергетична оцінки її вирощуванн. Це зумовлює необхідність комплексного аналізу сортів не лише за врожайністю, а й за економічною окупністю і біоенергетичним потенціалом.

Економічна оцінка проводилася за основними показниками: вартість валової продукції, виробничі витрати, умовно чистий прибуток, собівартість 1 т сухої біомаси та рівень рентабельності. Для розрахунків використано урожайність сухої біомаси за трирічний цикл вирощування. У роботі встановлено, що найвищу урожайність сухої біомаси забезпечив сорт '1052' – 27,81 т/га, дещо нижчу – '1047' ('Gigantea') – 26,06 т/га та 'Inger' – 23,77 т/га. Сорт '082' ('Warm-maz') сформував 21,24 т/га, тоді як значно нижчою продуктивність була у сортів 'Wilhelm' – 13,61 т/га та 'Tordis' – 8,85 т/га (табл. 5.4.1.)

Таблиця 5.4.1

Економічна ефективність вирощування сортів верби прутovidної за трирічного циклу заготівлі біомаси

| Сорт | Урожайність сухої біомаси, т/га | Вартість валової продукції, грн/га | Виробничі витрати, грн/га | Умовно чистий прибуток, грн/га | Собівартість 1 т біомаси, грн | Рентабельність, % |
|---------------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------|
| 'Tordis' | 8,85 | 26 550 | 35 000 | -8 450 | 3 955 | -24,1 |
| 'Inger' | 23,77 | 71 310 | 35 000 | 36 310 | 1 472 | 103,7 |
| 'Wilhelm' | 13,61 | 40 830 | 35 000 | 5 830 | 2 572 | 16,7 |
| '082' ('Warm-maz') | 21,24 | 63 720 | 35 000 | 28 720 | 1 648 | 82,1 |
| '1047' ('Gigantea') | 26,06 | 78 180 | 35 000 | 43 180 | 1 343 | 123,4 |
| '1052' | 27,81 | 83 430 | 35 000 | 48 430 | 1 259 | 138,4 |

Аналіз економічних показників свідчить, що найвищу економічну ефективність забезпечив сорт '1052', який за урожайності сухої біомаси 27,81 т/га сформував вартість валової продукції 83,43 тис. грн/га. Умовно чистий прибуток за вирощування цього сорту становив 48,43 тис. грн/га, а рівень рентабельності – 138,4 %. Найнижчою була собівартість 1 т сухої біомаси – 1259 грн/т, що підтверджує високу економічну доцільність використання цього сорту для створення енергетичних плантацій.

Дещо нижчі, але також високі економічні показники отримано за вирощування сорту '1047' ('Gigantea'). За урожайності сухої біомаси 26,06 т/га вартість валової продукції становила 78,18 тис. грн/га, умовно чистий прибуток – 43,18 тис. грн/га, а рівень рентабельності – 123,4 %. Собівартість 1 т біомаси становила 1343 грн/т, що лише незначно перевищувало відповідний показник сорту '1052'.

Високою економічною ефективністю характеризувався також сорт 'Inger', який забезпечив 23,77 т/га сухої біомаси. Вартість валової продукції за його вирощування становила 71,31 тис. грн/га, умовно чистий прибуток – 36,31 тис. грн/га, а рівень рентабельності – 103,7 %. Собівартість 1 т сухої біомаси становила 1472 грн/т. Отже, сорт 'Inger' також належить до економічно перспективних культиварів для вирощування на енергетичних плантаціях.

Сорт '082' ('Warm-maz') забезпечив урожайність сухої біомаси 21,24 т/га, що дало змогу отримати 63,72 тис. грн/га вартості валової продукції та 28,72 тис. грн/га умовно чистого прибутку. Рівень рентабельності становив 82,1 %, а собівартість 1 т біомаси – 1648 грн/т. Це свідчить про достатньо високу економічну ефективність сорту, хоча за рівнем прибутковості він поступався сортам '1052', '1047' ('Gigantea') та 'Inger'.

Нижчі економічні показники встановлено у сорту 'Wilhelm'. За урожайності сухої біомаси 13,61 т/га вартість валової продукції становила 40,83 тис. грн/га, умовно чистий прибуток – 5,83 тис. грн/га, а рівень рентабельності – 16,7 %. Собівартість 1 т біомаси становила 2572 грн/т, що істотно перевищувало показники більш продуктивних сортів. Найменш економічно ефективним був сорт 'Tordis', який за урожайності 8,85 т/га не забезпечив окупності виробничих витрат. Умовно чистий результат був від'ємним і становив -8,45 тис. грн/га, а рівень рентабельності – -24,1 %.

Отже, економічна ефективність вирощування верби прутovidної значною мірою залежала від сортових особливостей і рівня урожайності сухої біомаси. За однакового рівня виробничих витрат саме продуктивність сорту визначала собівартість одиниці продукції, величину умовно чистого прибутку та рівень рентабельності. Найбільш економічно доцільними для умов Правобережного Лісостепу України є сорти '1052', '1047' ('Gigantea') та 'Inger'.

Біоенергетична ефективність вирощування сортів верби прутovidної визначалася за виходом енергії з сухої біомаси, середньорічним енергетичним виходом, приростом енергії та коефіцієнтом енергетичної ефективності. Для розрахунку енергетичної продуктивності використано умовну теплотворну здатність сухої речовини 16,0 ГДж/т. Такий підхід уже застосовано в роботі для порівняння досліджуваних сортів за потенційним виходом енергії з одиниці площі.

Найвищий біоенергетичний потенціал мав сорт '1052', який забезпечив вихід енергії 445,0 ГДж/га, або 148,3 ГДж/га/рік. Приріст енергії становив 417,0 ГДж/га, а коефіцієнт енергетичної ефективності – 15,89. Це свідчить про високу здатність цього сорту акумулювати енергію в сухій біомасі та забезпечувати значну енергетичну віддачу з одиниці площі.

Сорт '1047' ('Gigantea') також характеризувався високою біоенергетичною ефективністю. За урожайності сухої біомаси 26,06 т/га вихід енергії становив 417,0 ГДж/га, або 139,0 ГДж/га/рік. Коефіцієнт енергетичної ефективності дорівнював 14,89, що підтверджує доцільність використання цього сорту для виробництва твердого біопалива.

Високі показники отримано і для сорту 'Inger', який забезпечив 380,3 ГДж/га енергії, або 126,8 ГДж/га/рік. Приріст енергії становив 352,3 ГДж/га, а коефіцієнт енергетичної ефективності – 13,58. Сорт '082' ('Warmmaz') сформував 339,8 ГДж/га енергії, або 113,3 ГДж/га/рік, за коефіцієнта

енергетичної ефективності 12,14. Ці показники підтверджують його достатньо високий потенціал для біоенергетичного використання (табл. 5.4.2.).

Таблиця 5.4.2

Біоенергетична ефективність вирощування сортів верби прутовидної за трирічного циклу заготівлі біомаси

| Сорт | Урожайність сухої біомаси, т/га | Теплотворна здатність, ГДж/т | Вихід енергії, ГДж/га | Середньорічний вихід енергії, ГДж/га/рік | Енергетичні витрати, ГДж/га | Приріст енергії, ГДж/га | Коефіцієнт енергетичної ефективності |
|-----------------------|---------------------------------|------------------------------|-----------------------|--|-----------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| ‘Tordis’ | 8,85 | 16,0 | 141,6 | 47,2 | 28,0 | 113,6 | 5,06 |
| ‘Inger’ | 23,77 | 16,0 | 380,3 | 126,8 | 28,0 | 352,3 | 13,58 |
| ‘Wilhelm’ | 13,61 | 16,0 | 217,8 | 72,6 | 28,0 | 189,8 | 7,78 |
| ‘082’ (‘Warmmaz’) | 21,24 | 16,0 | 339,8 | 113,3 | 28,0 | 311,8 | 12,14 |
| ‘1047’ (‘Giganta’) | 26,06 | 16,0 | 417,0 | 139,0 | 28,0 | 389,0 | 14,89 |
| ‘1052’ | 27,81 | 16,0 | 445,0 | 148,3 | 28,0 | 417,0 | 15,89 |

Нижчий вихід енергії встановлено у сорту ‘Wilhelm’ – 217,8 ГДж/га, або 72,6 ГДж/га/рік. Проте навіть за такого рівня продуктивності коефіцієнт енергетичної ефективності становив 7,78, що свідчить про позитивний енергетичний баланс. Найнижчий енергетичний вихід мав сорт ‘Tordis’ – 141,6 ГДж/га, або 47,2 ГДж/га/рік. Його коефіцієнт енергетичної ефективності становив 5,06, що підтверджує енергетичну доцільність вирощування, однак за рівнем ефективності цей сорт істотно поступався більш продуктивним культиварам.

Порівняння сортів показало, що енергетична продуктивність безпосередньо залежала від урожайності сухої біомаси. Оскільки хімічний склад біомаси досліджуваних сортів відрізнявся незначно, головним чинником формування енергетичного виходу з одиниці площі була саме кількість накопиченої сухої речовини. У роботі також зазначено, що висока частка

целюлози, геміцелюлози та лігніну забезпечує достатній енергетичний потенціал деревної біомаси, а відносно низький вміст хлору й сірки зменшує ризики корозії обладнання та небажаних викидів під час спалювання.

Комплексне зіставлення економічних і біоенергетичних показників дає змогу виділити три групи сортів за рівнем перспективності. До першої групи належать '1052', '1047' ('Gigantea') та 'Inger', які забезпечили найвищий рівень урожайності сухої біомаси, найменшу собівартість одиниці продукції, найбільший умовно чистий прибуток, високий рівень рентабельності та максимальний вихід енергії з одиниці площі. Ці сорти є найбільш перспективними для створення промислових енергетичних плантацій у Правобережному Лісостепу України.

До другої групи можна віднести сорт '082' ('Warm-maz'), який поступався лідерам за рівнем продуктивності, але забезпечував достатньо високі економічні та біоенергетичні показники. Його вирощування може бути доцільним у господарствах, де важливе поєднання стабільної продуктивності, позитивного енергетичного балансу та помірної собівартості біомаси.

До третьої групи належать сорти 'Wilhelm' і 'Tordis'. Сорт 'Wilhelm' забезпечував позитивний економічний результат, однак мав нижчу рентабельність і вищу собівартість біомаси порівняно з більш продуктивними сортами. Сорт 'Tordis' за прийнятих розрахункових умов не забезпечував економічної окупності, хоча його енергетичний баланс залишався позитивним. Це свідчить про те, що вирощування цього сорту на енергетичні цілі є менш доцільним у виробничих умовах.

Важливе значення для підвищення ефективності вирощування верби прутувидної має вибір оптимального строку першого зрізування. У роботі зазначено, що першу заготівлю енергетичної біомаси в умовах Правобережного Лісостепу України доцільно проводити переважно у чотирирічному віці, а надалі,

після формування добре розвиненої кореневої системи, ротаційний цикл може бути скорочений до двох-трьох років. Це має безпосереднє економічне значення, оскільки правильна періодичність зрізування дає змогу підвищити середньорічний вихід біомаси, зменшити собівартість продукції та підвищити рентабельність вирощування.

Отже, результати економічної та біоенергетичної оцінки свідчать, що вирощування верби прутовидної на енергетичних плантаціях є доцільним за умови добору високопродуктивних сортів і дотримання оптимального ротаційного циклу заготівлі біомаси. Найвищу ефективність забезпечили сорти '1052', '1047' ('Gigantea') та 'Inger', які поєднували високу урожайність сухої біомаси, значний вихід енергії, низьку собівартість і високий рівень рентабельності. Сорт '082' ('Warm-maz') також можна розглядати як перспективний, тоді як 'Wilhelm' і особливо 'Tordis' поступалися за комплексом економічних та енергетичних показників.

Таким чином, для створення високоефективних енергетичних плантацій верби прутовидної в умовах Правобережного Лісостепу України найбільш доцільним є використання сортів '1052', '1047' ('Gigantea') та 'Inger'. Їх вирощування забезпечує високий рівень біоенергетичної продуктивності, позитивний економічний результат і значну енергетичну окупність виробничих витрат, що підтверджує перспективність цих сортів для виробництва твердого біопалива та розвитку відновлюваної енергетики в аграрному секторі

Висновки до розділу 5. Проведена комплексна оцінка якості, енергетичної цінності та економічної ефективності біомаси верби прутовидної засвідчила, що перспективність сортів для створення енергетичних плантацій визначається не лише урожайністю, а й сукупністю якісних, паливних, технологічних та економічних показників. Біомаса досліджуваних сортів є цінною

лігноцелюлозною сировиною для виробництва твердого біопалива, а її основними структурними компонентами є целюлоза, геміцелюлоза та лігнін.

Якісні показники біомаси між сортами відрізнялися незначно, тому головним чинником формування енергетичного виходу з одиниці площі була урожайність сухої речовини. Найвищий енергетичний потенціал за трирічного циклу вирощування забезпечували сорти '1052', '1047' ('Gigantea') та 'Inger', які формували найбільший обсяг сухої біомаси в умовах Правобережного Лісостепу України.

Енергетична оцінка різних циклів вирощування показала, що надмірне подовження ротації до восьми років є менш доцільним, оскільки супроводжується зниженням середньорічного виходу енергії внаслідок сповільнення ростових процесів, пошкодження пагонів і часткового відмирання рослин. Найефективнішим є вирощування верби прутувидної у коротших ротаційних циклах, коли рослини зберігають високі темпи накопичення сухої біомаси.

За шестирічного циклу найвищий середньорічний вихід енергії забезпечували сорти 'Inger' і 'Wilhelm' – відповідно 101,6 і 85,0 ГДж/га/рік, а серед сортів польської селекції – 'Marzencinski' із показником 54,9 ГДж/га/рік. У восьмирічному віці найвищі значення також мали 'Inger' – 73,8 ГДж/га/рік і 'Wilhelm' – 62,2 ГДж/га/рік, однак вони були нижчими порівняно з коротшими циклами вирощування.

Економічна ефективність вирощування сортів безпосередньо залежала від урожайності сухої біомаси. За однакових виробничих витрат продуктивніші сорти забезпечували нижчу собівартість 1 т біомаси, вищий умовно чистий прибуток і більший рівень рентабельності. Найкращі економічні показники отримано у сортів '1052', '1047' ('Gigantea') та 'Inger'.

Отже, за комплексом продуктивності, якості біомаси, енергетичного виходу та економічної ефективності найбільш перспективними для створення енергетичних плантацій у Правобережному Лісостепу України є сорти '1052', '1047' ('Gigantea') та 'Inger'. Їх вирощування забезпечує високий вихід сухої біомаси й енергії з одиниці площі, позитивний економічний результат, зниження собівартості продукції та підвищення ефективності виробництва твердого біопалива.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення та практичне вирішення наукового завдання щодо встановлення особливостей росту, розвитку, продуктивності, якості біомаси та ефективності вирощування сортів верби прутовидної (*Salix viminalis* L.) в умовах Правобережного Лісостепу України. На основі проведених досліджень обґрунтовано добір перспективних сортів для створення високопродуктивних енергетичних плантацій і уточнено доцільність використання різних циклів заготівлі біомаси.

1. Аналіз сучасного стану використання біомаси в енергетиці засвідчив, що верба прутовидна є однією з найбільш перспективних деревних енергетичних культур для виробництва твердого біопалива. Її перевагами є висока інтенсивність росту, здатність до багаторазового відростання після зрізування, формування значної кількості лігноцелюлозної біомаси та можливість вирощування на землях, малоприсаєдбаних для традиційного інтенсивного землеробства.

2. Встановлено, що продуктивність енергетичних плантацій верби прутовидної істотно залежить від сортових особливостей, тривалості циклу вирощування та здатності рослин до формування продуктивних пагонів. Сорти відрізнялися між собою за висотою кущів, довжиною й діаметром пагонів, кількістю пагонів на рослині, сирою та сухою масою біомаси, що зумовлювало різний рівень їхньої господарської цінності.

3. За трирічного циклу вирощування найвищі показники росту та накопичення біомаси забезпечили сорти '1052', '1047' ('Gigantea') та 'Inger'. Середня висота кущів досліджуваних сортів змінювалася від 409,3 см у сорту 'Tordis' до 517,3 см у сорту '1052'. Високими показниками росту також характеризувалися сорти '1047', 'Wilhelm', 'Inger' та '082', що підтверджує значну роль генотипу у формуванні продуктивності насаджень.

4. Урожайність сухої біомаси за трирічного циклу вирощування істотно різнилася між сортами. Найвищу продуктивність забезпечив сорт '1052' – 27,81 т/га. Дещо нижчі, але також високі показники сформували сорти '1047' ('Gigantea') – 26,06 т/га та 'Inger' – 23,77 т/га. Сорт '082' ('Warm-maz') забезпечив 21,24 т/га сухої біомаси. Значно нижчою продуктивністю характеризувалися сорти 'Wilhelm' – 13,61 т/га та 'Tordis' – 8,85 т/га.

5. Дослідження біометричних показників підтвердило, що формування врожаю біомаси залежить від комплексної взаємодії висоти рослин, довжини пагонів, їх діаметра, кількості пагонів на кущ і маси одного куща. Висока продуктивність сорту не завжди визначалася лише одним морфометричним показником, а була результатом поєднання інтенсивного росту, достатньої кущистості, доброї збереженості рослин і здатності до накопичення сухої речовини.

6. За триваліших циклів вирощування встановлено, що надмірне подовження періоду без зрізування до восьми років є менш ефективним. У восьмирічних насадженнях спостерігалось зниження середньорічного приросту біомаси, що пов'язано зі сповільненням ростових процесів, частковим пошкодженням пагонів, відмиранням верхівок і зменшенням інтенсивності формування продуктивної деревної маси. Тому для енергетичного використання доцільнішими є коротші ротаційні цикли, які забезпечують вищу середньорічну продуктивність.

7. Встановлено, що біомаса досліджуваних сортів верби прутovidної є цінною лігноцелюлозною сировиною для виробництва твердого біопалива. Її основними структурними компонентами є целюлоза, геміцелюлоза та лігнін. Якісні показники біомаси між сортами відрізнялися незначно, тому вирішальним чинником формування енергетичного виходу з одиниці площі була урожайність сухої речовини.

8. За трирічного циклу вирощування найвищий розрахунковий вихід енергії забезпечив сорт '1052' – 445,0 ГДж/га, або 148,3 ГДж/га/рік. Сорт '1047' ('Gigantea') сформував 417,0 ГДж/га, або 139,0 ГДж/га/рік, а сорт 'Inger' – 380,3 ГДж/га, або 126,8 ГДж/га/рік. Сорт '082' ('Warm-maz') забезпечив 339,8 ГДж/га, або 113,3 ГДж/га/рік. Нижчі показники енергетичної продуктивності отримано у сортів 'Wilhelm' і 'Tordis'.

9. Енергетична оцінка довших циклів вирощування показала, що за шестирічного циклу найвищий середньорічний вихід енергії забезпечували сорти 'Inger' і 'Wilhelm' – відповідно 101,6 і 85,0 ГДж/га/рік, а серед сортів польської селекції – 'Marzencinski' із показником 54,9 ГДж/га/рік. У восьмирічному віці середньорічний вихід енергії зменшувався; найвищі значення залишалися у сортів 'Inger' – 73,8 ГДж/га/рік та 'Wilhelm' – 62,2 ГДж/га/рік.

10. Економічна ефективність вирощування сортів верби прутovidної безпосередньо залежала від урожайності сухої біомаси. Найвищий умовно чистий прибуток і рівень рентабельності забезпечив сорт '1052' – відповідно 48,43 тис. грн/га і 138,4 %. Високими економічними показниками також характеризувалися сорти '1047' ('Gigantea') – 43,18 тис. грн/га умовно чистого прибутку і 123,4 % рентабельності та 'Inger' – 36,31 тис. грн/га і 103,7 %. Найнижчу економічну ефективність мав сорт 'Tordis', який за прийнятих розрахункових умов не забезпечив окупності виробничих витрат.

11. Комплексне оцінювання сортів за показниками росту, урожайності сухої біомаси, якості сировини, енергетичного виходу та економічної ефективності дало змогу виділити найбільш перспективні культивари для створення енергетичних плантацій у Правобережному Лісостепу України. До них належать '1052', '1047' ('Gigantea') та 'Inger', які забезпечили найкраще поєднання високої продуктивності, значного виходу енергії, позитивного

економічного результату та придатності біомаси до використання як твердого біопалива.

12. Науково обґрунтовано, що ефективність вирощування верби прутовидної в умовах Правобережного Лісостепу України залежить від правильного добору сорту та оптимізації строків заготівлі біомаси. Перше зрізування доцільно проводити після формування достатньо розвиненої кореневої системи та надземної маси, а подальшу експлуатацію плантацій здійснювати за короткочасними циклами, які забезпечують стабільне відростання рослин і високий середньорічний вихід сухої біомаси.

13. Отже, вирощування верби прутовидної є перспективним напрямом виробництва відновлюваної енергетичної сировини в умовах Правобережного Лісостепу України. Використання сортів '1052', '1047' ('Gigantea') та 'Inger' дає змогу підвищити продуктивність енергетичних плантацій, забезпечити високий вихід сухої біомаси й енергії з одиниці площі, знизити собівартість продукції та підвищити ефективність виробництва твердого біопалива.

РЕКОМЕНДАЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ

1. Для створення енергетичних плантацій в умовах Правобережного Лісостепу України найбільш придатними є сорти верби прутовидної ‘1052’, ‘1047’ (‘Gigantea’) та ‘Inger’. Також перспективними для окремих умов вирощування є сорти ‘Wilhelm’ і ‘Marzencinski’. Менш придатними є культивари ‘Warm-maz’ та ‘Tordis’.

2. Оптимальна густина садіння енергетичних плантацій верби прутовидної становить 12–15 тис. живців на 1 га.

3. Для підвищення урожайності енергетичних плантацій верби прутовидної доцільно застосовувати трирічний цикл заготівлі біомаси. Першу заготівлю біомаси рекомендується проводити у віці чотирьох років.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Афонін О.О., Фучило Я. Д. Генетичний потенціал верби прутовидної (*Salix viminalis* L.) Середнього Подесення. Науковий вісник НУБіП України. 2012. Вип. 171. Ч. 1. С. 11–19.
2. Василенко І. Д., Філіпова Л. М., Фучило Я. Д. Підвищення тривалості життя деяких видів чагарників Білоцерківщини періодичним обрізуванням. Науковий вісник НУБіП України. 2014. Вип.189. Ч. 1. С. 78 – 85.
3. Гелетуха Г.Г., Желєзна Т.А., Жовмір М.М., Матвєєв Ю.Б., Дроздова О.І. Оцінка енергетичного потенціалу біомаси в Україні. Частина 2. Енергетичні культури, рідкі біопалива, біогаз. Промышленная теплотехника. 2011. С.50–55.
4. Державна служба статистики України. Енергетичний баланс України за 2020. Експрес – випуск від 30.11.2021 р.
5. Енергетична верба: технологія вирощування та використання: монографія. Під загальною редакцією доктора с. – г. наук, професора В.М. Сінченка /. [М.В. Роїк, В.М. Сінченко, Я.Д. Фучило та ін.]/ Вінниця: ТВОРИ, 2023. 346 с.
6. Левчук Тимур, Фучило Ярослав, Карпович Марина, Дзиба Богдан. Ріст деяких сортів верби прутовидної на вилугуваних чорноземах. Матеріали Студентської науково – практичної конференції «Ліс – об'єкт наукових досліджень» (24 квітня 2024 року, Малинський фаховий коледж). С.73 – 79.
7. Левчук Т.А., Фучило Я.Д. Продуктивність шести сортів верби прутовидної за трирічного циклу заготівлі біомаси. Біоенергетика / Bioenergy. № 2 (24). 2024. С. 35 – 37. [https://doi.org/10.47414/be.2024.No2.pp 35 – 37](https://doi.org/10.47414/be.2024.No2.pp.35-37)
8. Левчук Тимур, Ганженко Олександр, Фучило Ярослав. Ріст і продуктивність деяких сортів верби прутовидної на вилугуваних чорноземах Правобережного Лісостепу. Лісовирощування: історична та інноваційна діяльність у галузі лісового господарства [електронне видання] : збірник матеріалів II

- Всеукраїнської науково – практичної конференції до 205 – річчя з дня народження В. Є. фон Граффа, м. Овруч – Малин, 08 листопада 2024 року. Малин : Малинський фаховий коледж. Видавництво: МФК, 2024. С. 117 – 118.
9. Левчук Т., Фучило Я. Динаміка росту іноземних сортів верби прутовидної на вилугуваних чорноземах центрального Лісостепу України. Актуальні питання розвитку сільського господарства: теорія і практика: матеріали Міжнародної науково – практичної конференції (м. Івано – Франківськ, 9 жовтня 2025 року). Оброшине: Видавництво інституту сільського господарства Карпатського регіону, 2025. С. 90 – 93.
10. Методологія дослідження енергетичних плантацій верб і тополь: монографія / за ред. члена – кореспондента НААН В.М. Сінченка / [Я.Д. Фучило, В.М. Сінченко, О.М. Ганженко, М.Я. Гументик та ін.]. К.: ТОВ «ЦП «Компринт», 2018. 137 с. (ISBN 978 – 966 – 929 – 733 – 4)
11. Присяжнюк О.І., Фучило Я.Д., Левчук Т.А. Оцінка адаптації деяких клонів енергетичної верби до ґрунтово-кліматичних умов за ефективністю функціонування фотосинтетичного апарату. Матеріали Міжнародної науково – практичної конференції «Поліські наукові читання» – 2025 м. Чернігів, 02–04 грудня 2025 р. Чернігів: НУ "Чернігівський колегіум" ім.Т.Г.Шевченка, 2025. С. 166 – 167.
12. Роїк М.В., Гументик М.Я., Мамайсур В.В. Перспективи вирощування енергетичної верби для виробництва твердого біопалива. Біоенергетика, 2013, № 2. С. 18–19.
13. Сировинна економіка. Що купувала і продавала Україна в 2021 році. БізнесЦензор: <https://biz.censor.net/r3310713>
14. Сінченко В. М., Гнап І. В. Вплив основних елементів живлення на продуктивність енергетичної верби. Біоенергетика. 2018. № 1. С. 9–12.

15. Сінченко В.М., Фучило Я.Д., Ганженко О.М., Гументик М.Я., Гнап І.В., Іванюк І.Д. Інтродукція високопродуктивних сортів енергетичної верби та технологічні аспекти її вирощування: монографія. К.: Компринт, 2022. 206 с.
16. Створення та вирощування енергетичних плантацій верб і тополь. Науково – методичні рекомендації / Фучило Я.Д., Сбитна М.В., Фучило О.Я., Літвін В.М. К.: Логос, 2009. 80 с.
17. Фучило Я.Д., Сбитна М.В. Вербі України: біологія, екологія, використання: монографія. Видання друге, виправлене і доповнене. К.: ЦП «Компринт», 2017. 259 с.
18. Фучило Я. Д., Левчук Т. А., Машир М. А. Ріст і продуктивність деяких сортів верби прутувидної на вилугуваних чорноземах Правобережного Лісостепу. // Лісівнича освіта і наука: стан, проблеми та перспективи розвитку. Збірник матеріалів V Міжнародної науково – практичної конференції студентів, магістрів, аспірантів, молодих вчених і викладачів, м. Малин, 21 березня 2023 року. Малин: Вид – во МФК, 2023. С. 268.
19. Фучило Я.Д., Сінченко В.М., Вокальчук Б.М., Іванюк І.Д. Продуктивність енергетичних плантацій верби прутувидної впродовж другого трирічного циклу вирощування: монографія. Житомир: НОВОград, 2022. 140 с.
20. Фучило Я. Д. Авторське свідоцтво на сорт рослин № 04194. Україна. Назва сорту: Тернопільська, ботанічний таксон: верба прутувидна (*Salix viminalis* L.) / (Україна). Заявка № 03404001. Дата держ. реєстрації: 26.12.2003 р., № 04308.
21. Фучило Я.Д., Сінченко В.М., Вокальчук Б.М., Іванюк І.Д. Продуктивність енергетичних плантацій верби прутувидної впродовж другого трирічного циклу вирощування: монографія. Житомир: НОВОград, 2022. 140 с.
22. Фучило Я.Д., Зелінський Б.В., Іванюк І.Д., Зелінська Л.Г. Вирощування енергетичних плантацій верби на маргінальних землях Київського Полісся: монографія. Житомир: НОВОград, 2023. 144 с.

23. Фучило Я.Д., Сбитна М.В. Верби України: біологія, екологія, використання: монографія. Видання друге, виправлене і доповнене. К.: ЦП «Компринт», 2017. 259 с.
24. Фучило Я.Д., Бодрусь О.О., Бодрусь О.Ю., Кирилко Я.О. Особливості вирощування однорічних живцевих саджанців тополі у Правобережному Лісостепу // Лісівнича освіта і наука: стан, проблеми та перспективи розвитку: Збірник матеріалів учасників Міжнародної науково – практичної конференції студентів, магістрів, аспірантів, молодих вчених і викладачів (19 травня 2022 р., м.Малин). Малин: Вид – во МФК, 2022. С. 150 – 153.
25. Фучило Я.Д., Левчук Т.А. Продуктивність верби прутovidної залежно від сортових особливостей та періодичності заготівлі біомаси. // Біоенергетика / Bioenergy. № 1 (23). 2024. С. 16–18.
26. Лісова таксація: навч. – метод. посіб. / В.П. Пастернак, В.В. Назаренко. Харків: ХНАУ, 2019. 111 с.
27. Ache, P., Fromm, J., and Hedrich, R. (2010). Potassium – dependent wood formation in poplar: seasonal aspects and environmental limitations. *Plant Biol.* 12, 259–267. doi: 10.1111/j.1438 – 8677.2009.00282.x
28. Adedoyin F.F., Alola A.A., Bekun F.V. An assessment of environmental sustainability corridor: The role of economic expansion and research and development in EU countries. *Science of the Total Environment.* 2020. Vol. 713. N136726.
29. Adegbidi H.G., Briggs R.D., Volk T.A., White E.H., Abrahamson L.P. (2003). Effect of organic amendments and slow – release nitrogen fertilizer on willow biomass production and soil chemical characteristics. *Biomass Bioenergy* 25(4): 389–398

30. Adegbidi H.G., Volk T.A., White E.H., Abrahamson L.P., Briggs R.D., Bickelhaupt D.H. (2001). Biomass and nutrient removal by willow clones in experimental bioenergy plantations in New York State. *Biomass Bioenergy* 20(6): 399–411
31. Adoption of the Paris agreement. Approved 12.12.2015. Режим доступа: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>
32. Ahmad M., Ahmed Z., Majeed A., Huang. B. An environmental impact assessment of economic complexity and energy consumption: Does institutional quality make a difference? *Environmental Impact Assessment Review*. 2021. Vol. 89. N106603. doi:10.1016/j.eiar.2021.106603.
33. Alriksson B. (1997). Influence of site factors on *Salix* growth with emphasis on nitrogen response under different soil conditions. *Acta universitatis agriculturae Sueciae, Silvestria*, 46
34. A review of renewable energy and power system integration // *Applied and Computational Engineering*. 2025. URL: <https://ace.ewapub.com/article/view/20092>
35. Aronsson P., Rosenqvist H., Dimitriou I. (2014). Impact of nitrogen fertilization to short – rotation willow coppice plantations grown in Sweden on yield and economy. *Bioenergy Research*, 7, 993–1001.
36. Aronsson P., Dahlin T., Dimitriou I. (2010). Treatment of landfill leachate by irrigation of willow coppice – plant response and treatment efficiency. *Environmental Pollution*, 158, 795–804.
37. Aronsson P.G., Bergstråm L.F., Elowson S.N.E. Long – term influence of intensively cultured shortrotation willow coppice on nitrogen concentrations in groundwater. *Journal of Environmental Management*, 2000, 58:135–45.
38. Aronsson, P., and K. Perttu. 2001. Willow vegetation filters for wastewater treatment and soil remediation combined with biomass production. *The For. Chron.* 77:293–299.

39. Bergkvist, P., Ledin, S., (1998). Stem biomass yields at different planting designs and spacings in willow coppice systems. *Biomass and Bioenergy* 14, 149–156.
40. Berndes G., Hoogwiczjck M., van der Broek R. (2005). The contribution of biomass in the Future global Energy system: A review of 17 studies. *Biomass Bioenerg.*, 25, 1–28.
41. Borz A., Papandrea S., Zoli M., Bacenetti J., Proto A. R. (2024). Willow short rotation coppice. Energy and environmental assessment. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2024.100249>
42. Brereton, N. J. B., Ahmed, F., Sykes, D., Ray, M. J., Shield, I., Karp, A. et al. (2015). X – ray micro – computed tomography in willow reveals tissue patterning of reaction wood and delay in programmed cell death. *BMC Plant Biol.* 15:83. doi: 10.1186/s12870 – 015 – 0438 – 0
43. Caslin, Finnan, & Mc Cracken. (Eds.). (2012). *Willow Varietal Identification Guide*. Carlow, Ireland : Teagasc.
44. Checklist for cultivars of *Salix* L. (willow) International *Salix* Cultivar Registration Authority FAO – International Poplar Commissio. First version. November 2015 163 p. https://salix.psla.uconn.edu/wp – content/uploads/sites/3416/2021/11/CHECKLIST – for – CULTIVARS – of – Salix – L. – willow.pdf?utm_source=chatgpt.com
45. Christersson L (1986). High Technology Biomass Production by *Salix* Clones on a Sandy Soil in Southern Sweden. *Tree Physiology* 2: 261 – 277.
46. El Bassam, N. (2012). *Handbook of Bioenergy Crops: A Complete Reference to Species, Development and Applications*. London/Washington, DC: Earthscan.
47. Ericsson T, Rytter L, Linder S (1992) Nutritional dynamics and requirements of short rotation forests. In: *Ecophysiology of Short Rotation Forest Crops* (eds Mitchell CP, Ford – Robertson JB, Hinckley TM, Sennerby – Forsse L), pp. 32–65. Elsevier Applied Science, London, UK.

48. Fuchylo Ya. D., Levchuk T. A. Growth characteristics of foreign willow (*Salix viminalis* L.) varieties on leached chernozems of the Central Forest – Steppe. *Plant Varieties Studying and Protection*. № 2 (21). 2025. C. 94 – 99. DOI: <https://doi.org/10.21498/2518 – 1017.21.2.2025.333455>
49. Fromm, J. (2010). Wood formation of trees in relation to potassium and calcium nutrition. *Tree Physiol.* 30, 1140–1147. doi: 10.1093/treephys/tpq024 genotypes with differing biomass composition for biofuel production. *Front.*
50. Goel, V. L. and Behl, H. M. (1996). Fuelwood quality of promising tree species for alkaline soil sites in relation to tree age. *Biomass Bioenergy* 10, 57–61. doi: 10.1016/0961 – 9534(95)00053 – 4
51. Goglio, P. and P.M.O. Owende. (2009). A screening LCA of short rotation coppice willow (*Salix* sp.) feedstock production system for small – scale electricity generation. *Biosys. Engineer.* 103: 389 – 394.
52. GUS, 2009. *Energy from Renewable Sources in 2008. Information and Statistics.* GUS, Warsaw.
53. Hangs R.D., Schoenau J.J., Van Rees K.C.J., Knight J.D. (2012). The effect of irrigation on nitrogen uptake and use efficiency of two willow (*Salix* spp.) biomass energy varieties. *Canadian Journal of Plant Science*, 92, 563–575.
54. Heller, M.C., G.A. Keoleian, and T.A. Volk. (2003). Life cycle assessment of a willow bioenergy cropping system. *Biomass Bioenerg.* 25:147–16
55. <https://www.researchgate.net/publication/324000579>
56. Jeżowski S., Głowacka K., Kaczmarek Z., Szczukowski S. Yield traits of eight common osier clones in the first three years following planting in Poland. *Biomass and Bioenergy*. Volume 35, Issue 3, March 2011, P. 1205 – 1210.
57. Khanna, P.H., and Ulrich B. (1984). Soil characteristics influencing nutrient supply in forest soils. p. 79 – 117. In G.D. Bowen, and E.K.S. Nambiar (ed.) *Nutrition of plantation forests* Academic Press, New York.

58. Kim, S., and Dale B.E. (2005). Life cycle assessment of various cropping systems utilized for producing biofuels: Bioethanol and biodiesel. *Biomass Bioenerg.* 29:426–439.
59. Kopp R.F., Abrahamson L.P., White E.H., Volk T.A., Nowak C.A., Fillhart R.C. (2001) Willow biomass production during ten successive annual harvests. *Biomass Bioenergy* 20(1):1–7
60. Kopp R.F., Smart L.B., Maynard C.A., Isebrands J.G., Tuskan G.A., Abrahamson L.P. (2001). The Development of Improved Willow Clones for Eastern North America. *The forestry chronicle* 77: 287–292.
61. Kopp, R.F., Abrahamson, L.P., White, E.H., Burns, K.F., Nowak, C.A., (1997). Cutting cycle and spacing effects on biomass production by a willow clone in New York. *Biomass and Bioenergy* 12, 313 – 319.
62. Ledin S., and Willebrand E. (eds.) (1995). Handbook on how to grow short rotation forests. Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala, Sweden.
63. Livingstone D., Smyth B.M., Lyons G., Foley A.M., Murray S.T., Johnston C. (2022). Life cycle assessment of a short – rotation coppice willow riparian buffer strip for farm nutrient mitigation and renewable energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158 (2022), Article 112154
64. Mansfield S. D. and Weineisen H. (2007). Wood fibre quality and kraft pulping efficiencies of trembling Aspen (*Populus tremuloides* Michx) clones. *J. Wood Chem. Technol.* 27, 135–151. doi: 10.1080/02773810701700786
65. Mirck J., Isebrands J.G., Verwijst T. and Ledin S. (2005). Development of short – rotation willow coppice systems for environmental purposes in Sweden. *Biomass Bioenerg.* 28:219–228.
66. Mitchell C.P., Ford – Robertson J.B., Hinckley T., Sennerby – Forsse L. (Editors) (1992). *Ecophysiology of Short Rotation Forest Crops*. Elsevier, London.

67. Mola Yudego B., Aronsson P. (2008). Yield Models for Commercial Willow Biomass Plantations in Sweden. *Biomass & bioenergy* 32: 829–837
68. Mortensen J., Nielsen K.H., Jorgensen U. (1998). Nitrate leaching during establishment of willow (*Salix viminalis*) on two soil types and at two fertilization levels. *Biomass Bioenergy* 15(6): 457–466 *Plant Sci.* 4:57. doi: 10.3389/fpls.2013.00057
69. Mundaca L., Urge – Vorsatz D., Wilson C. Demand – side approaches for limiting global warming to 1.5 degrees C. *Energy Efficiency*. Vol. 2019. Vol. 12. Iss. 2. P. 343–362. DOI: 10.1007/s12053 – 018 – 9722 – 9
70. Neves A., Godina R., Azevedo S.G., Matias J.C.O. A comprehensive review of industrial symbiosis. *Journal Of Cleaner Production*. 2019. Vol. 247. N119113. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.119113
71. Nyman T. Willows of Northern Europe. A guide to the identification and ecology of a northern keystone plant group. https://willows – of – northern – europe.org/Salix_triandra.html. Last updated 26.04.2020
72. Pittau F., Lumia G., Heeren N., Iannaccone G., Habert G. Retrofit as a carbon sink: The carbon storage potentials of the EU housing stock. *Journal Of Cleaner Production*. 2019. Vol. 214. P. 365 – 376. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.304
73. Pollock A., Grant, K.R., Schoonmaker A. Size Influences on the Survival of Willow Cuttings Under Operational Field Conditions (2025). *Ecology and Evolution* 15:e70835 <https://doi.org/10.1002/ece3.70835>
74. Quaye A.K, Volk T.A., Hafner S., Leopold D.J., Schirmer C. (2011). Impacts of paper sludge and manure on soil and biomass production of willow. *Biomass Bioenergy* 35(7):2796–2806
75. Quinn R.J., Ha H., Volk T.A., Brown T.R., Bick S., Malmsheimer R.W., Fortier M.O.P. Life cycle assessment of forest biomass energy feedstock in the Northeast United States. *Gcb Bioenergy*, 12 (9) (2020), pp. 728 – 741.

76. Sennerby – Forsse L. (1986). Handbook for Energy Forestry, pp. 29. Swedish University of Agricultural Sciences, SEF, Uppsala, Sweden
77. Shaul, O. (2002). Magnesium transport and function in plants: the tip of the iceberg. *Biometals* 15, 309–323. doi: 10.1023/A:1016091118585
78. Solarin S.A. An environmental impact assessment of fossil fuel subsidies in emerging and developing economies. *Environmental Impact Assessment Review*. 2020. Vol. 85. № 106443. doi:10.1016/j.eiar.2020.106443
79. Teske S., Pregger T. Achieving the Paris Climate Agreement Goals Global and Regional 100% Renewable Energy Scenarios with Non – energy GHG Pathways for+1.5 degrees C and+2 degrees C Introduction. *Achieving The Paris Climate Agreement Goals: Global and Regional 100% Renewable Energy Scenarios with Non – Energy Ghg Pathways for +1.5(Degree)C and +2(Degree)C*. P. 1 – 4. DOI: 10.1007/978 – 3 – 030 – 05843 – 2_1
80. Volk, T.A., Verwijst T., Tharakan P.J., Abrahamson L.P. and White E.H. (2004). Growing fuel: a sustainability assessment of willow biomass crops. *Front. Ecol. Environ.* 2:411–418.
81. WBA Global Bioenergy Statistics 2014, ст.п. 4–7.
82. White, P. J., and Karley, A. J. (2010). “Potassium,” in *Plant Cell Monographs Cell Biology of Metals and Nutrients*, eds R. Hell and R. – R. Mendel (Dordrecht:Springer), 199–224
83. *Willow Varietal Identification Guide* / B. Caslin, J. Finnan, A. McCracken (eds) / Crops Research Centre, Carlow & Agri – Food Bioscience Institute. Carlow, Ireland : Teagasc, 2012. 64.
84. www.researchgate.net/publication/263610023
85. Фучило Я.Д., Левчук Т.А. Продуктивність верби прутовидної залежно від сортових особливостей та періодичності заготівлі біомаси. *Біоенергетика / Bioenergy*. № 1 (23). 2024. С. 16–18.

86. Borz S. A., Talagai N., Marcu M. V. Willow short rotation coppice. Energy and environmental perspectives: A review. *Smart Agricultural Technology*. 2025. Vol. 10. Article 100870. DOI: 10.1016/j.atech.2024.100870.
87. Stolarski M. J., Szczukowski S., Tworkowski J., Krzyżaniak M., Załuski D., Śnieg M. Production of poplar and willow for industrial and energy purposes over an eight – year harvest cycle. *Industrial Crops and Products*. 2025. Vol. 232. Article 121292. DOI: 10.1016/j.indcrop.2025.121292.
88. Castellano Albors A., Shepherd A., Shield I., Macalpine W. J., Lindegaard K., Tubby I., Hastings A. A Global Short Rotation Coppice (SRC) Willow Dataset for the Bioeconomy. *GCB Bioenergy*. 2025. Vol. 17, No. 9. Article e70069. DOI: 10.1111/gcbb.70069.
89. Matyka M., Radzikowski P. Productivity and biometric characteristics of 11 varieties of willow cultivated on marginal soil. *Agriculture*. 2020. Vol. 10, No. 12. Article 616. DOI: 10.3390/agriculture10120616.
90. Labrecque M., Daigle S., Olishevskaya S. Comparing biomass yields of various willow cultivars in short – rotation coppice over six growing seasons across a broad climatic gradient in Eastern Canada. *Canadian Journal of Forest Research*. 2023. Vol. 53, No. 7. P. 533–543. DOI: 10.1139/cjfr – 2022 – 0205.
91. Vâtcă S. D., Vâtcă A., Stoian V., Vidican R., Mălinaş A., Rotar I. et al. Primary growth effect of *Salix viminalis* L. cv. Inger and Tordis cuttings under the influence of water, gibberellic acid and humic acid treatments. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, No. 15. Article 9272. DOI: 10.3390/su14159272.
92. Johnston C. R., McCracken A. R., Dawson W. M., Ferris R., McCracken K. J. et al. Effect of two vs. three year harvest intervals on yields of short rotation coppice willow. *Biomass and Bioenergy*. 2022. Vol. 162. Article 106489. DOI: 10.1016/j.biombioe.2021.106489.

93. Stolarski M. J., Gil Ł., Krzyżaniak M., Olba – Zięty E., Wu A. – M. Willow, poplar, and black locust debarked wood as feedstock for energy and other purposes. *Energies*. 2024. Vol. 17, No. 7. Article 1535. DOI: 10.3390/en17071535.
94. Sandak A., Sandak J., Grossi P., Brzezicki M., Negro F. Selection of optimal conversion path for willow biomass. *iForest – Biogeosciences and Forestry*. 2017. Vol. 10. P. 757–764. DOI: 10.3832/ifor1987 – 010.
95. Livingstone D., Smyth B. M., Lyons G., Foley A. M., Murray S. T., Johnston C. Life cycle assessment of a short – rotation coppice willow riparian buffer strip for farm nutrient mitigation and renewable energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 158. Article 112154.
96. Busch G., Lamersdorf N., Schulz U., Köhn J., Leinweber P., Aronsson P. et al. Quantifying environmental effects of Short Rotation Coppice (SRC) on biodiversity, soil and water. IEA Bioenergy Task 43 Report. 2011.
97. Caslin B., Finnan J., McCracken A. Short Rotation Coppice Willow: Best Practice Guidelines. Carlow: Teagasc; Agri – Food and Biosciences Institute, 2015. 52 p.
98. European Parliament and Council. Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources. *Official Journal of the European Union*. 2018. L328. P. 82–209.
99. European Parliament and Council. Directive (EU) 2023/2413 amending Directive (EU) 2018/2001 as regards the promotion of energy from renewable sources. *Official Journal of the European Union*. 2023.
100. IEA. *Renewables 2024: Analysis and forecast to 2030*. Paris: International Energy Agency, 2024.
101. IRENA. *Renewable Capacity Statistics 2024*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2024.
102. Bioenergy Europe. *Statistical Report 2024: Bioenergy Landscape*. Brussels: Bioenergy Europe, 2024.

103. World Bioenergy Association. Global Bioenergy Statistics 2023. Stockholm: WBA, 2023.
104. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Geneva: IPCC, 2023.
105. FAO. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture: Systems at breaking point. Rome: FAO, 2021.
106. FAO. Bioenergy and Food Security: The BEFS Analytical Framework. Rome: FAO, 2010.
107. GBEP. The Global Bioenergy Partnership Sustainability Indicators for Bioenergy. First edition. Rome: GBEP Secretariat, FAO, 2011.
108. Scarlat N., Dallemand J. – F., Fahl F. Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*. 2018. Vol. 129. P. 457–472.
109. Scarlat N., Dallemand J. – F., Monforti – Ferrario F., Nita V. The role of biomass and bioenergy in a future bioeconomy: Policies and facts. *Environmental Development*. 2015. Vol. 15. P. 3–34.
110. McKendry P. Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. *Bioresource Technology*. 2002. Vol. 83, No. 1. P. 37–46.
111. McKendry P. Energy production from biomass (part 2): Conversion technologies. *Bioresource Technology*. 2002. Vol. 83, No. 1. P. 47–54.
112. McKendry P. Energy production from biomass (part 3): Gasification technologies. *Bioresource Technology*. 2002. Vol. 83, No. 1. P. 55–63.
113. Demirbaş A. Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2004. Vol. 30, No. 2. P. 219–230.
114. Vassilev S. V., Baxter D., Andersen L. K., Vassileva C. G. An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*. 2010. Vol. 89, No. 5. P. 913–933.
115. Vassilev S. V., Baxter D., Andersen L. K., Vassileva C. G., Morgan T. J. An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. *Fuel*. 2012. Vol. 94. P. 1–33.

116. Jenkins B. M., Baxter L. L., Miles T. R., Miles T. R. Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*. 1998. Vol. 54. P. 17–46.
117. Obernberger I., Thek G. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy*. 2004. Vol. 27. P. 653–669.
118. Baxter L. Biomass – coal co – combustion: Opportunity for affordable renewable energy. *Fuel*. 2005. Vol. 84. P. 1295–1302.
119. Bridgwater A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*. 2012. Vol. 38. P. 68–94.
120. Chum H., Faaij A., Moreira J., Berndes G., Dhamija P., Dong H. et al. *Bioenergy*. In: *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
121. McCormick K., Kåberger T. Key barriers for bioenergy in Europe. *Biomass and Bioenergy*. 2007. Vol. 31. P. 443–452.
122. Weih M. Intensive short rotation forestry in boreal climates: Present and future perspectives. *Canadian Journal of Forest Research*. 2004. Vol. 34. P. 1369–1378.
123. Weih M., Nordh N. – E. Determinants of biomass production in hybrid willows and prediction of field performance from pot studies. *Tree Physiology*. 2002. Vol. 22. P. 1197–1206.
124. Verwijst T. Willows: An underestimated resource for environment and society. *Forestry Chronicle*. 2001. Vol. 77. P. 281–285.
125. Smart L. B., Cameron K. D. Genetic improvement of willow (*Salix* spp.) as a dedicated bioenergy crop. In: *Genetic Improvement of Bioenergy Crops*. New York: Springer, 2008. P. 377–396.
126. Fabio E. S., Smart L. B. Effects of harvest interval and cultivar on shrub willow biomass production. *BioEnergy Research*. 2018. Vol. 11. P. 1–14.

127. Volk T. A., Abrahamson L. P., Nowak C. A., Smart L. B., Tharakan P. J., White E. H. The development of short – rotation willow in the northeastern United States. *Biomass and Bioenergy*. 2006. Vol. 30. P. 715–727.
128. Serapiglia M. J., Cameron K. D., Stipanovic A. J., Smart L. B. Analysis of biomass composition for selection of shrub willow bioenergy crop varieties. *BioEnergy Research*. 2009. Vol. 2. P. 1–9.
129. Kuzovkina Y. A., Quigley M. F. Willows beyond wetlands: Uses of *Salix L.* species for environmental projects. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2005. Vol. 162. P. 183–204.
130. Kuzovkina Y. A., Volk T. A. The characterization of willow (*Salix L.*) varieties for use in ecological engineering applications. *Ecological Engineering*. 2009. Vol. 35. P. 1178–1189.
131. Dimitriou I., Aronsson P. Willows for energy and phytoremediation in Sweden. *Unasylva*. 2005. Vol. 56. P. 47–50.
132. Dimitriou I., Rutz D. *Sustainable Short Rotation Coppice: A Handbook*. Munich: WIP Renewable Energies, 2015. 108 p.
133. Dimitriou I., Mola – Yudego B., Aronsson P. Impact of willow short rotation coppice on water quality. *BioEnergy Research*. 2012. Vol. 5. P. 537–545.
134. Baum C., Leinweber P., Weih M., Lamersdorf N. Effects of short rotation coppice with willows and poplar on soil ecology. *Agriculture and Forestry Research*. 2009. Vol. 59. P. 183–196.
135. Baum S., Bolte A., Weih M. High value of short rotation coppice plantations for phytodiversity in rural landscapes. *GCB Bioenergy*. 2012. Vol. 4. P. 728–738.
136. Rowe R. L., Street N. R., Taylor G. Identifying potential environmental impacts of large – scale deployment of dedicated bioenergy crops in the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009. Vol. 13. P. 271–290.

137. Donnison C., Holland R. A., Hastings A., Armstrong L. – M., Eigenbrod F., Taylor G. BECCS: Finding the win – wins for energy, negative emissions and ecosystem services. *GCB Bioenergy*. 2020. Vol. 12. P. 586–604.
138. Djomo S. N., El Kasmioui O., Ceulemans R. Energy and greenhouse gas balance of bioenergy production from poplar and willow: A review. *GCB Bioenergy*. 2011. Vol. 3. P. 181–197.
139. Njakou Djomo S., Ac A., Zenone T., De Groote T., Bergante S., Facciotto G. et al. Energy performances of short rotation cropping systems for woody biomass production in the EU. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 41. P. 845–854.
140. Agostini A., Giuntoli J., Boulamanti A. Carbon accounting of forest bioenergy: Conclusions and recommendations from a critical literature review. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014.
141. Don A., Osborne B., Hastings A., Skiba U., Carter M. S., Drewer J. et al. Land – use change to bioenergy production in Europe. *GCB Bioenergy*. 2012. Vol. 4. P. 372–391.
142. Styles D., Thorne F., Jones M. B. Energy crops in Ireland: An economic comparison of willow and *Miscanthus* production with conventional farming systems. *Biomass and Bioenergy*. 2008. Vol. 32. P. 407–421.
143. Heller M. C., Keoleian G. A., Mann M. K., Volk T. A. Life cycle energy and environmental benefits of generating electricity from willow biomass. *Renewable Energy*. 2004. Vol. 29. P. 1023–1042.
144. Sims R. E. H., Hastings A., Schlamadinger B., Taylor G., Smith P. Energy crops: Current status and future prospects. *Global Change Biology*. 2006. Vol. 12. P. 2054–2076.

145. Lindegaard K. N., Adams P. W. R., Holley M., Lamley A., Henriksson A. et al. Short rotation plantations policy history in Europe. *Food and Energy Security*. 2016. Vol. 5. P. 125–152.
146. Tubby I., Armstrong A. Establishment and management of short rotation coppice. Practice Note. Edinburgh: Forestry Commission, 2002. 12 p.
147. DEFRA. Planting and Growing Short Rotation Coppice. Best Practice Guidelines. London: Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2004.
148. Biomass Energy Centre. A Guide to Short Rotation Coppice (SRC). Farnham: Forest Research, 2011.
149. Guidi W., Piccioni E., Ginanni M., Bonari E. Bark content estimation in poplar and willow short rotation coppice. *Biomass and Bioenergy*. 2008. Vol. 32. P. 518–524.
150. Manzone M., Bergante S., Facciotto G. Energy and economic evaluation of a poplar plantation for woodchips production in Italy. *Biomass and Bioenergy*. 2014. Vol. 60. P. 164–170.
151. Nassi o Di Nasso N., Guidi W., Ragaglini G., Tozzini C., Bonari E. Biomass production and energy balance of a 12 – year – old short – rotation coppice poplar stand under different cutting cycles. *GCB Bioenergy*. 2010. Vol. 2. P. 89–97.
152. Guidi W., Piccioni E., Ginanni M., Bonari E. Bark content estimation in poplar and willow short rotation coppice. *Biomass and Bioenergy*. 2008. Vol. 32. P. 518–524.
153. Szczukowski S., Tworkowski J., Stolarski M. *Wierzba energetyczna*. Kraków : Plantpress, 2004.
154. Szczukowski S., Tworkowski J., Stolarski M., Przyborowski J., Klasa A. Productivity of willow coppice plants grown in short rotations. *Plant, Soil and Environment*. 2005. Vol. 51, No. 9. P. 423–430.
155. Szczukowski S., Tworkowski J., Stolarski M. *Wierzba krzewiasta – uprawa i możliwości wykorzystania*. Olsztyn : Uniwersytet Warmińsko – Mazurski, 2002.

156. Szczukowski S., Tworkowski J., Wiwat M., Przyborowski J. *Wiklina (Salix L.). Uprawa i możliwości wykorzystania*. Warszawa : SGGW, 1998.
157. Stolarski M. J., Szczukowski S., Tworkowski J., Krzyżaniak M., Gulczyński P., Mleczek M. Comparison of quality and production cost of woody biomass from different plant species cultivated in short rotations. *Renewable Energy*. 2013. Vol. 57. P. 20–26.
158. Krzyżaniak M., Stolarski M. J., Szczukowski S., Tworkowski J. Life cycle assessment of willow produced in short rotation coppices for energy purposes. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*. 2015. Vol. 9. P. 1–9.
159. Szczukowski S., Stolarski M., Tworkowski J., Przyborowski J., Klasa A. Productivity of willow coppice plants grown in short rotations. *Plant, Soil and Environment*. 2005. Vol. 51(9). P. 423–430.
160. Рожков А. О., Пузік В. К., Каленська С. М., Пузік Л. М., Попов С. І., Музафаров Н. М., Бухало В. Я., Криштоп Є. А. Дослідна справа в агрономії. Книга 1. Теоретичні аспекти дослідної справи. Харків : Майдан, 2016. 316 с.
161. Рожков А. О., Каленська С. М., Пузік Л. М., Музафаров Н. М. Дослідна справа в агрономії. Книга 2. Статистична обробка результатів агрономічних досліджень. Харків : Майдан, 2016. 352 с.
162. Мойсейченко В. Ф., Єщенко В. О. Основи наукових досліджень в агрономії. Київ : Вища школа, 1994. 334 с.
163. Роїк М. В., Сінченко В. М., Ганженко О. М., Фучило Я. Д. Методика проведення польових та лабораторних досліджень з енергетичними культурами. Київ : ІБКіЦБ НААН, 2014.
164. Методика проведення польових досліджень з енергетичними культурами / за ред. М. В. Роїка. Київ : ФОП Корзун Д. Ю., 2014. 143 с.

165. Методологія дослідження енергетичних плантацій верб і тополь : монографія / за ред. В. М. Сінченка ; Я. Д. Фучило, В. М. Сінченко, О. М. Ганженко, М. Я. Гументик та ін. Київ : ТОВ «ЦП Компрінт», 2018. 137 с.
166. Mead R., Curnow R. N., Hasted A. M. *Statistical Methods in Agriculture and Experimental Biology*. 3rd ed. Boca Raton : Chapman & Hall/CRC, 2003. 488 p.
167. Gomez K. A., Gomez A. A. *Statistical Procedures for Agricultural Research*. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 1984. 680 p.
168. Montgomery D. C. *Design and Analysis of Experiments*. 10th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2020. 688 p.
169. Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith M. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome : FAO, 1998. 300 p.
170. WMO. *Guide to Climatological Practices*. WMO-No. 100. Geneva : World Meteorological Organization, 2018.
171. Microsoft Corporation. *Microsoft Excel*. Redmond, WA : Microsoft Corporation.
172. StatSoft Inc. *STATISTICA for Windows. Computer Program Manual*. Tulsa, OK: StatSoft Inc.
173. Borz S. A., Talagai N., Marcu M. V. Willow short rotation coppice. Energy and environmental perspectives: A review. *Smart Agricultural Technology*. 2025. Vol. 10. Article 100870. DOI: 10.1016/j.atech.2024.100870.
174. Szczukowski S., Stolarski M., Tworkowski J., Przyborowski J., Klasa A. Productivity of willow coppice plants grown in short rotations. *Plant, Soil and Environment*. 2005. Vol. 51, No. 9. P. 423–430. DOI: 10.17221/3607-PSE.
175. Stolarski M. J., Szczukowski S., Tworkowski J., Klasa A. Productivity of seven clones of willow coppice in annual and quadrennial cutting cycles. *Biomass and Bioenergy*. 2008. Vol. 32, No. 12. P. 1227–1234. DOI: 10.1016/j.biombioe.2008.02.023.

176. Jeżowski S., Głowacka K., Kaczmarek Z., Szczukowski S. Yield traits of eight common osier clones in the first three years following planting in Poland. *Biomass and Bioenergy*. 2011. Vol. 35, No. 3. P. 1205–1210. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.12.005.
177. Stolarski M. J., Szczukowski S., Tworkowski J., Krzyżaniak M., Gulczyński P., Mleczek M. Comparison of quality and production cost of woody biomass from different plant species cultivated in short rotations. *Renewable Energy*. 2013. Vol. 57. P. 20–26. DOI: 10.1016/j.renene.2013.01.012.
178. Krzyżaniak M., Stolarski M. J., Szczukowski S., Tworkowski J. Life cycle assessment of willow produced in short rotation coppices for energy purposes. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*. 2015. Vol. 9, No. 5. P. 566–578. DOI: 10.1166/jbmb.2015.1572.
179. Sneath P. H. A., Sokal R. R. *Numerical Taxonomy: The Principles and Practice of Numerical Classification*. San Francisco : W. H. Freeman, 1973. 573 p.
180. Ward J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*. 1963. Vol. 58, No. 301. P. 236–244.
181. Murtagh F., Legendre P. Ward’s hierarchical agglomerative clustering method: which algorithms implement Ward’s criterion? *Journal of Classification*. 2014. Vol. 31. P. 274–295. DOI: 10.1007/s00357-014-9161-z.
182. Mohammadi S. A., Prasanna B. M. Analysis of genetic diversity in crop plants - salient statistical tools and considerations. *Crop Science*. 2003. Vol. 43, No. 4. P. 1235–1248.
183. Govindaraj M., Vetriventhan M., Srinivasan M. Importance of genetic diversity assessment in crop plants and its recent advances: an overview of its analytical perspectives. *Genetics Research International*. 2015. Vol. 2015. Article ID 431487.
184. Tharakan P. J., Volk T. A., Nowak C. A., Abrahamson L. P. Morphological traits of 30 willow clones and their relationship to biomass production. *Canadian Journal of Forest Research*. 2005. Vol. 35, No. 2. P. 421–431. DOI: 10.1139/x04-195.

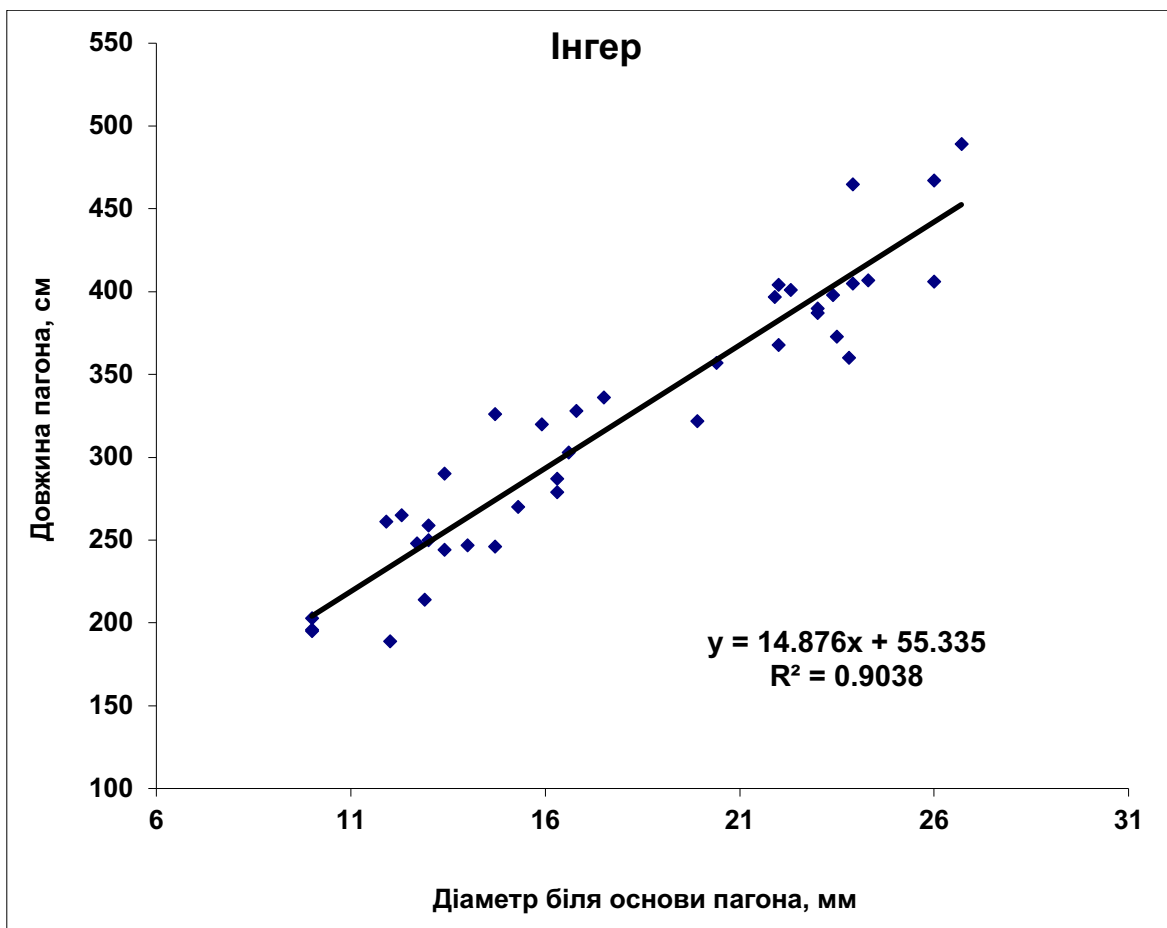
185. Matyka M., Radzikowski P. Productivity and biometric characteristics of 11 varieties of willow cultivated on marginal soil. *Agriculture*. 2020. Vol. 10, No. 12. Article 616. DOI: 10.3390/agriculture10120616.
186. Stolarski M. J., Szczukowski S., Tworkowski J., Krzyżaniak M., Załuski D., Śnieg M. Production of poplar and willow for industrial and energy purposes in short rotation woody crops. *Industrial Crops and Products*. 2025. Vol. 225. Article 120433. DOI: 10.1016/j.indcrop.2025.120433.
187. Labrecque M., Daigle S., Olishevskaya S. Comparing biomass yields of various willow cultivars in short-rotation coppice over six growing seasons across a broad climatic gradient in Eastern Canada. *Canadian Journal of Forest Research*. 2023. Vol. 53, No. 7. P. 533–543. DOI: 10.1139/cjfr-2022-0205.
188. Johnston C. R., McCracken A. R., Dawson W. M., Ferris R., McCracken K. J., et al. Effect of two vs. three year harvest intervals on yields of short rotation coppice willow. *Biomass and Bioenergy*. 2022. Vol. 162. Article 106489. DOI: 10.1016/j.biombioe.2021.106489.
189. Vâtcă S. D., Vâtcă A., Stoian V., Vidican R., Mălinaş A., Rotar I., Mălinaş C., et al. Primary growth effect of *Salix viminalis* L. cv. Inger and Tordis cuttings under the influence of water, gibberellic acid and humic acid treatments. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, No. 15. Article 9272. DOI: 10.3390/su14159272.

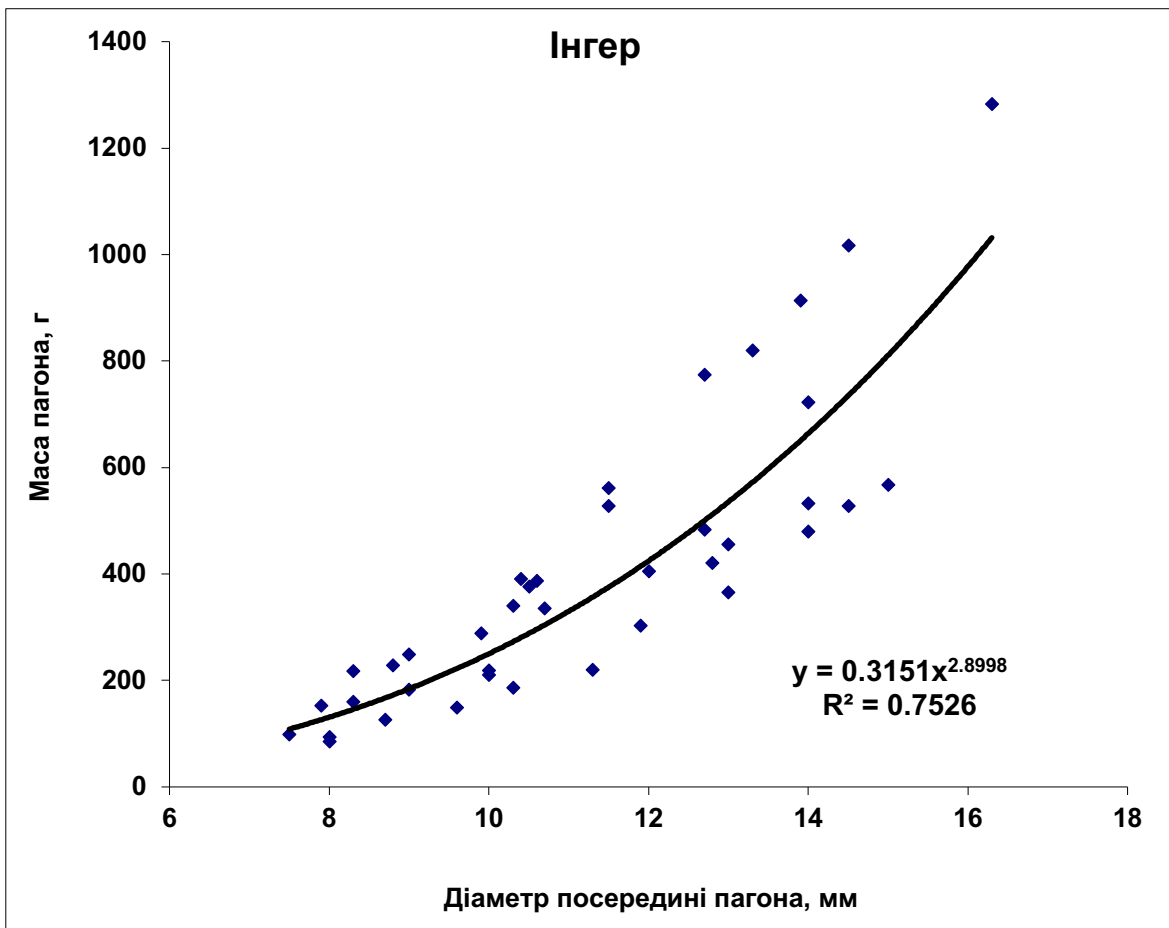
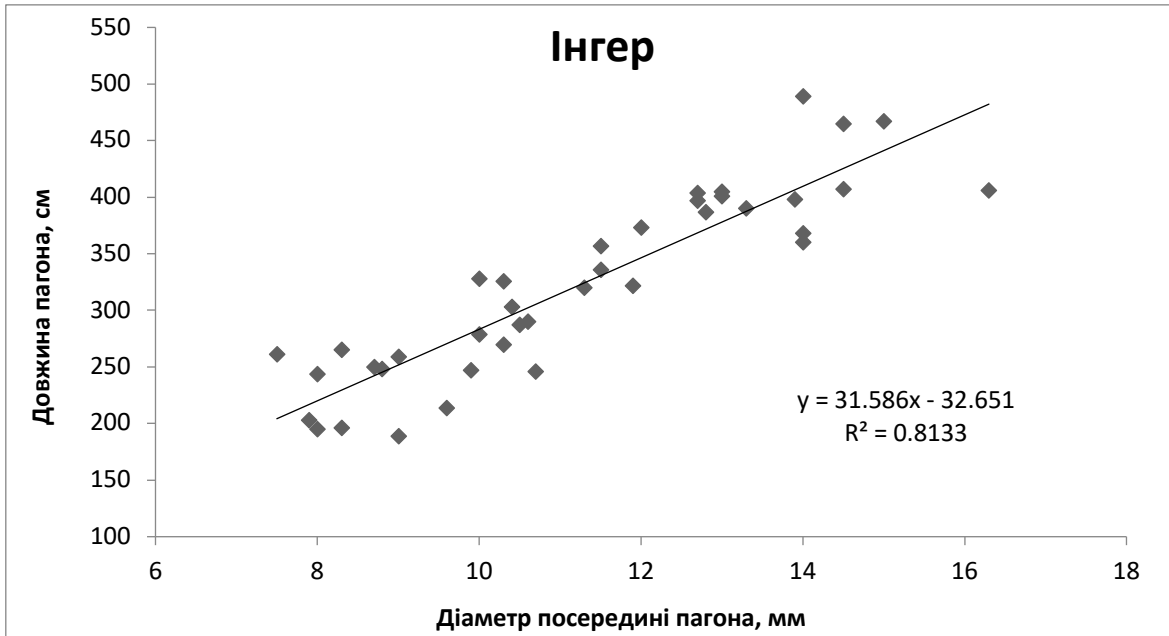
ДОДАТКИ

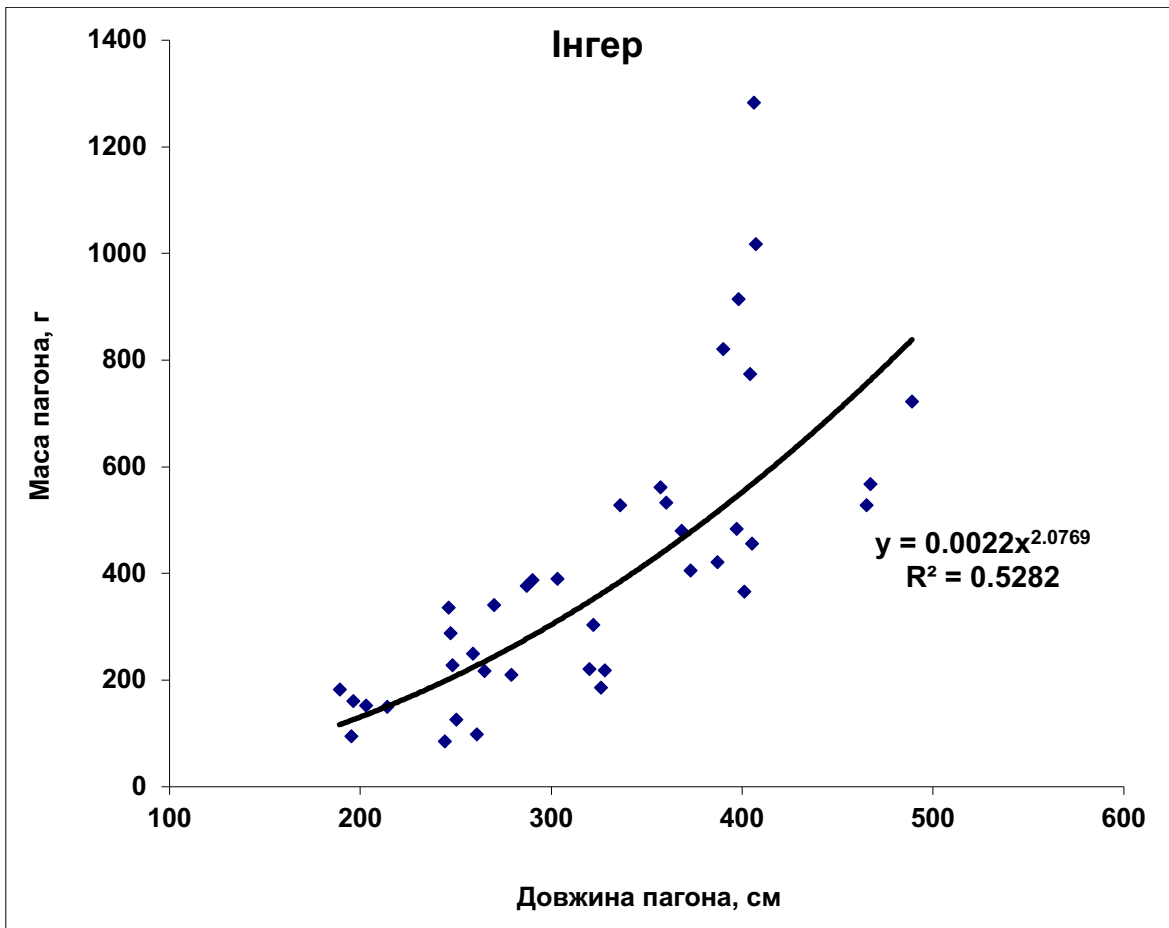
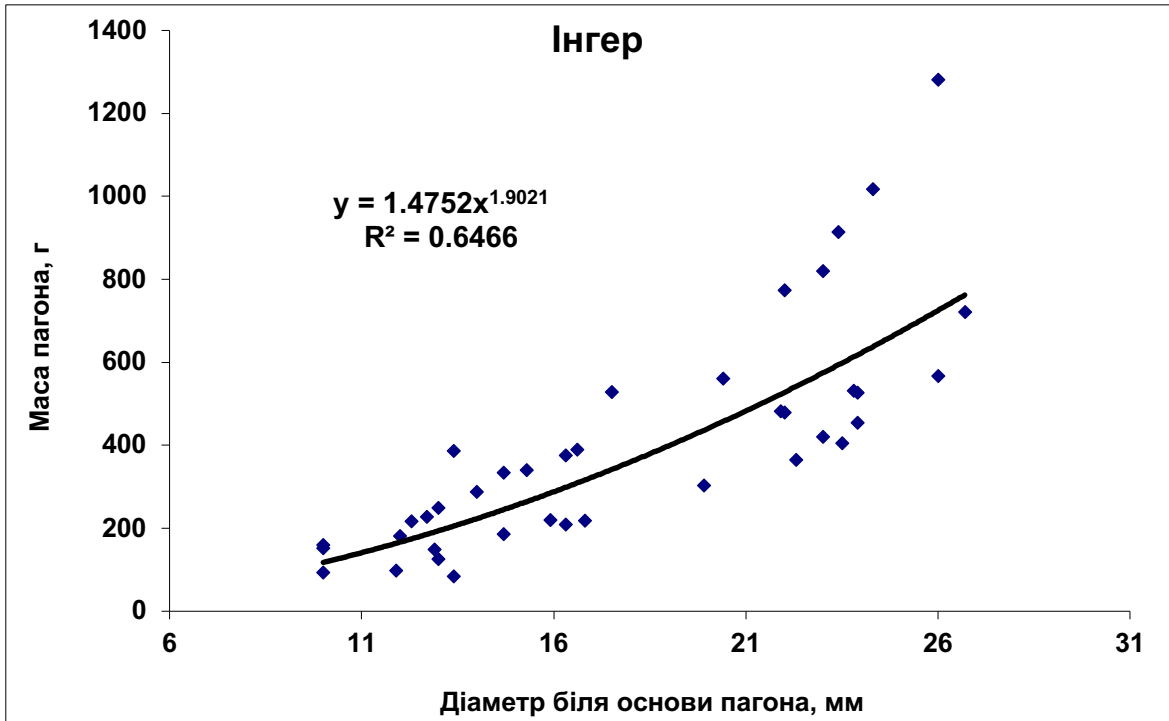
**Додаток А Взаємозв'язки між біометричними показниками
трирічних пагонів верби прутovidної**

**Додаток А.1 Кореляційна матриця та графіки взаємозв'язків між
біометричними показниками трирічних пагонів верби прутovidної
сорту Інгер (Дослідне поле ІБКіЦБ, 2024 р.)**

| | Довжина пагона | Діаметр посередині пагона | Діаметр біля основи пагона |
|----------------------------|----------------|---------------------------|----------------------------|
| Довжина пагона | 1 | | |
| Діаметр посередині пагона | 0,90 | 1 | |
| Діаметр біля основи пагона | 0,95 | 0,95 | 1 |
| Маса 1 пагона | 0,74 | 0,85 | 0,80 |

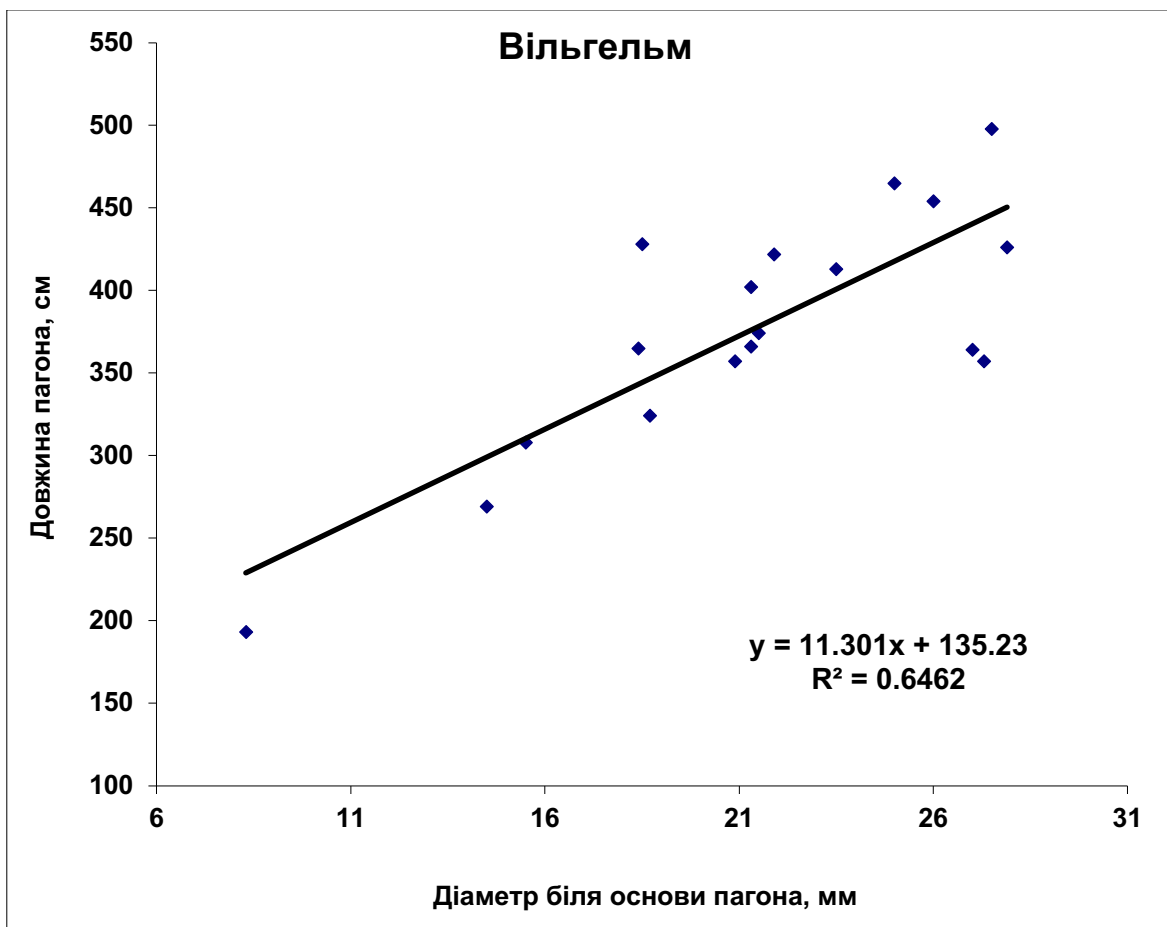


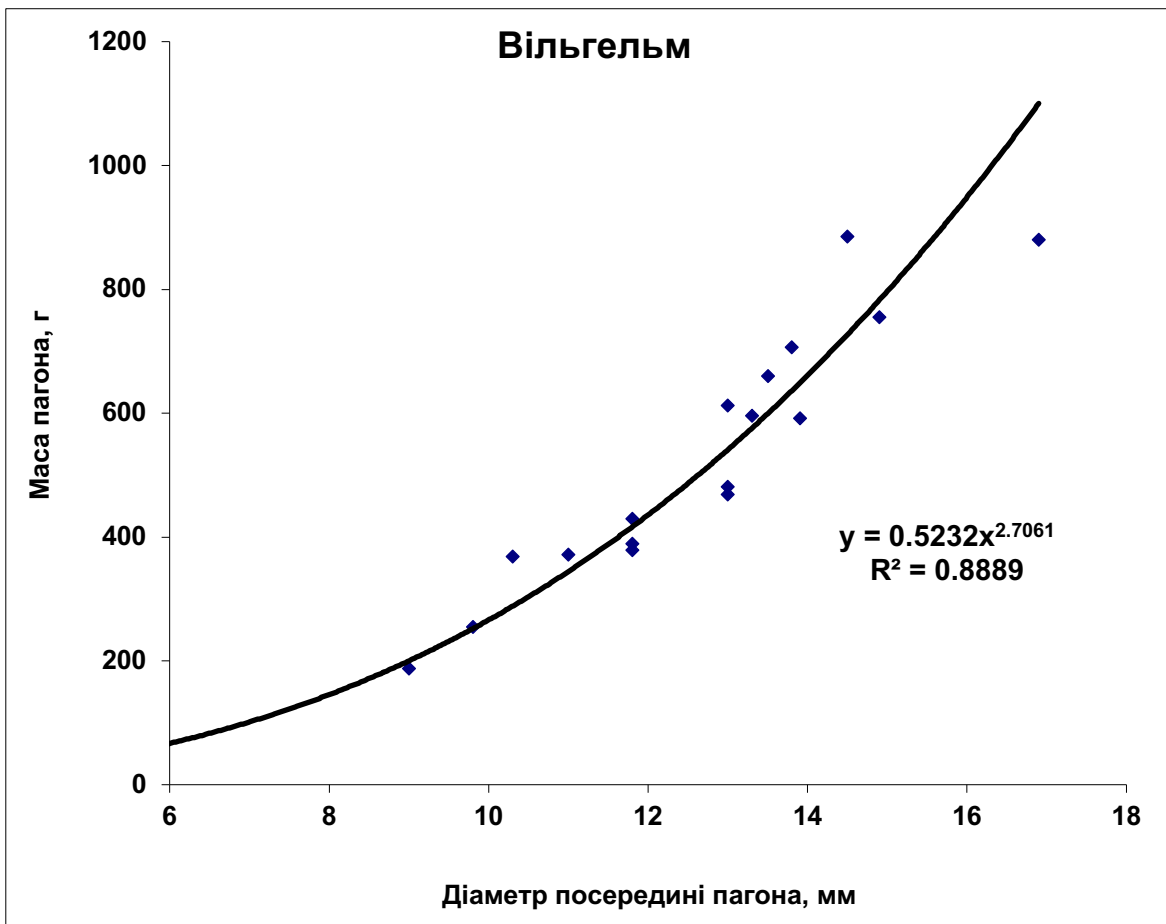
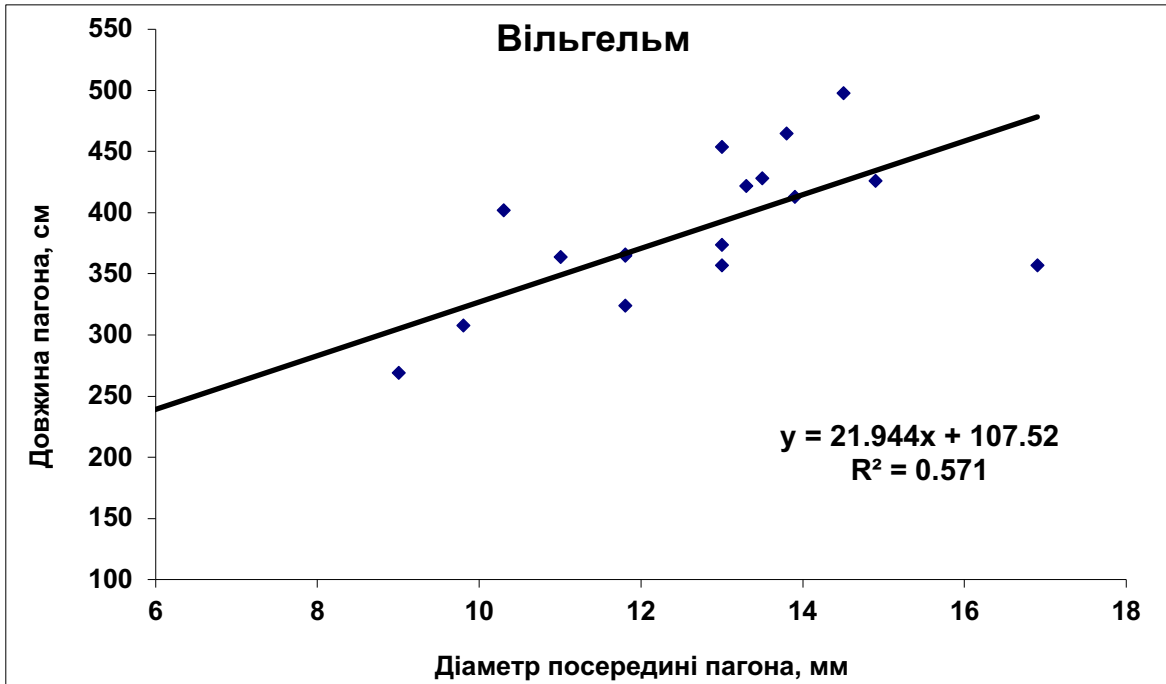


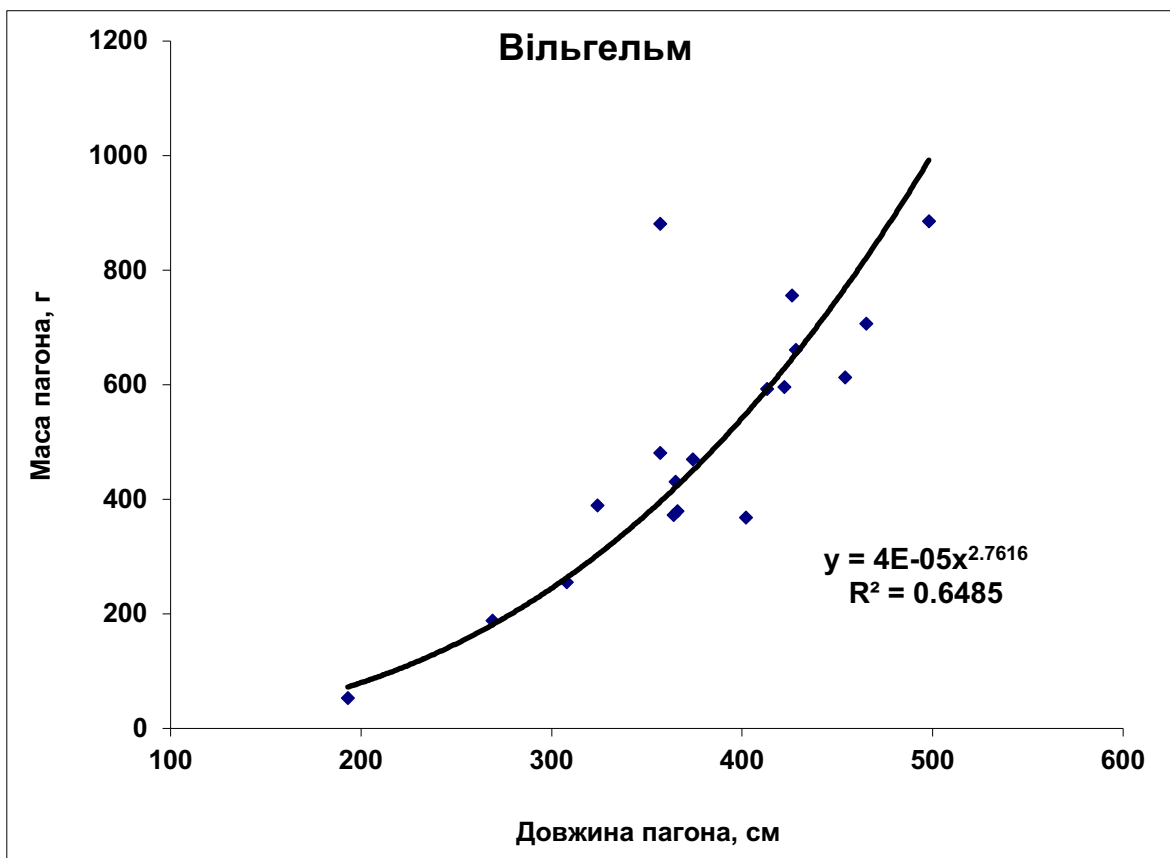
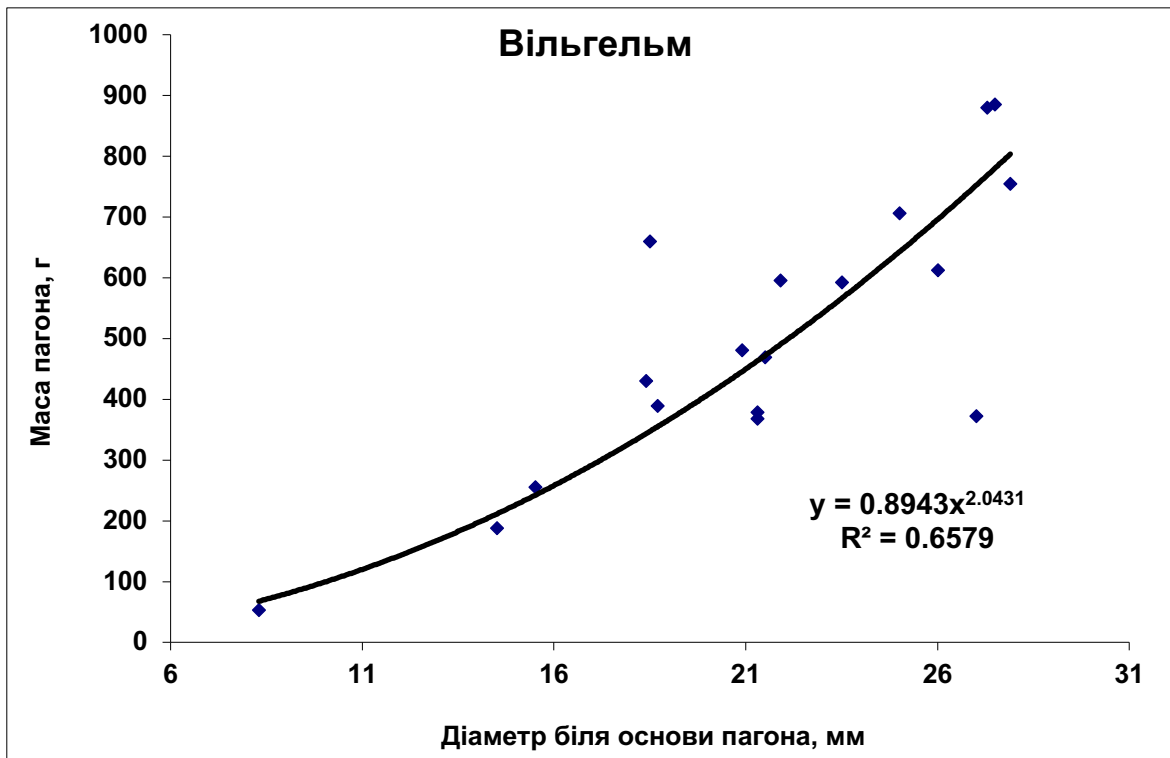


Додаток А.2 Кореляційна матриця та графіки взаємозв'язків між біометричними показниками трирічних пагонів верби прутувидної сорту Вільгельм (Дослідне поле ІБКіЦБ, 2024 р.)

| | Довжина пагона | Діаметр посередині пагона | Діаметр біля основи пагона |
|----------------------------|----------------|---------------------------|----------------------------|
| Довжина пагона | 1 | | |
| Діаметр посередині пагона | 0,76 | 1 | |
| Діаметр біля основи пагона | 0,80 | 0,83 | 1 |
| Маса 1 пагона | 0,82 | 0,94 | 0,82 |

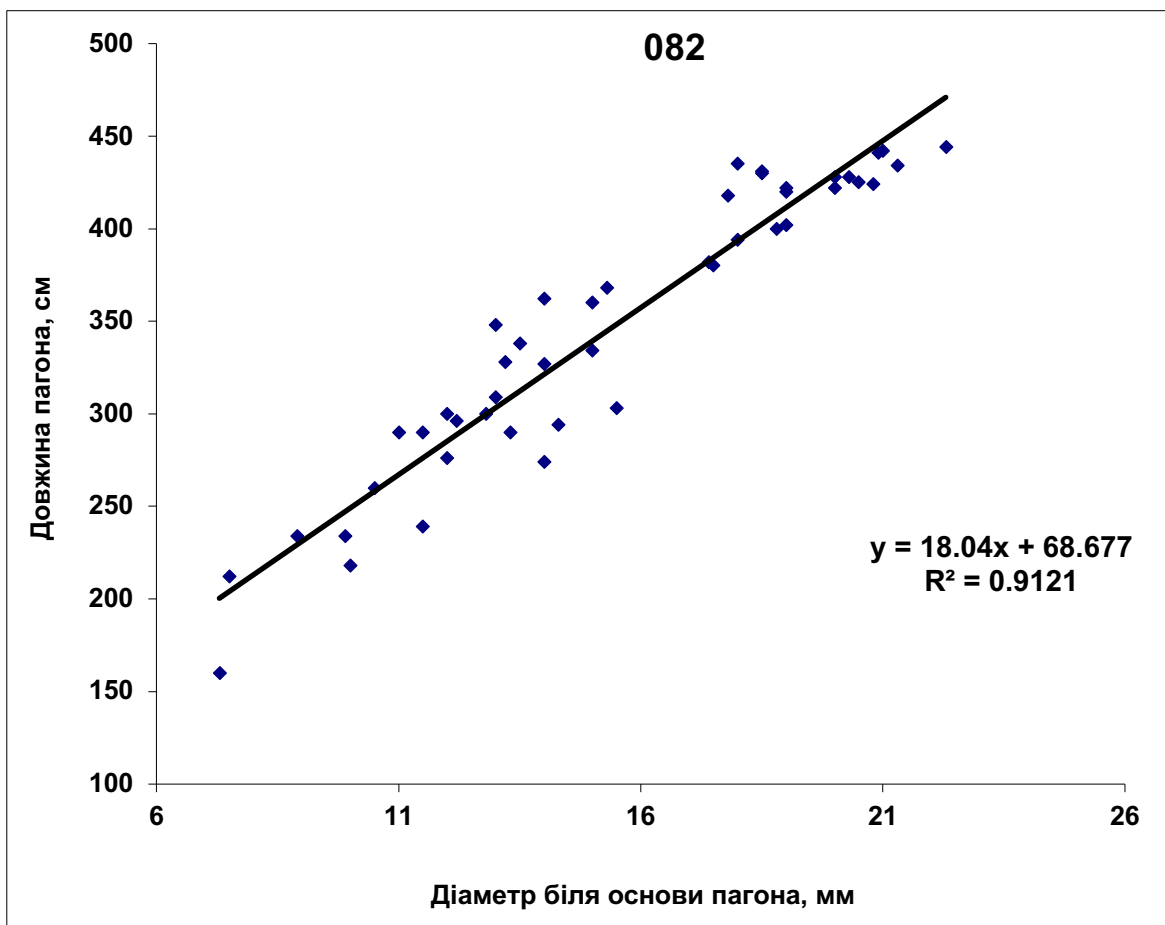


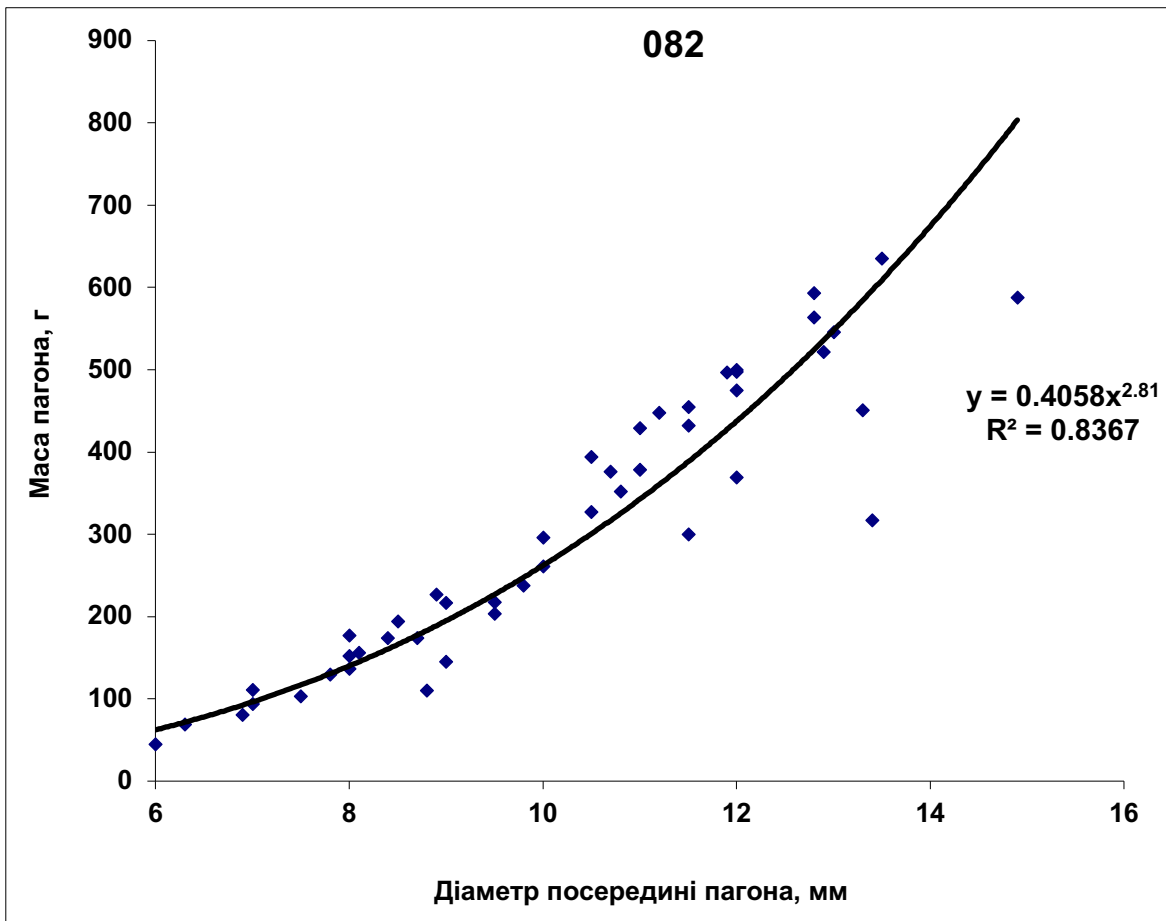
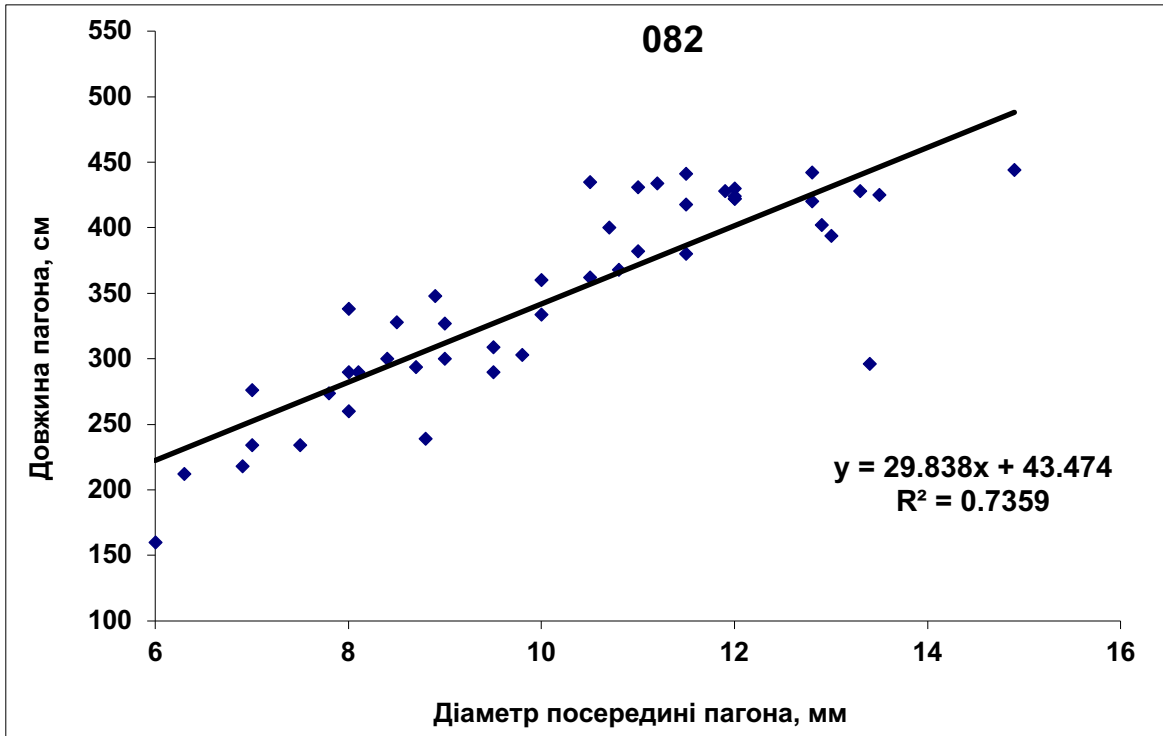


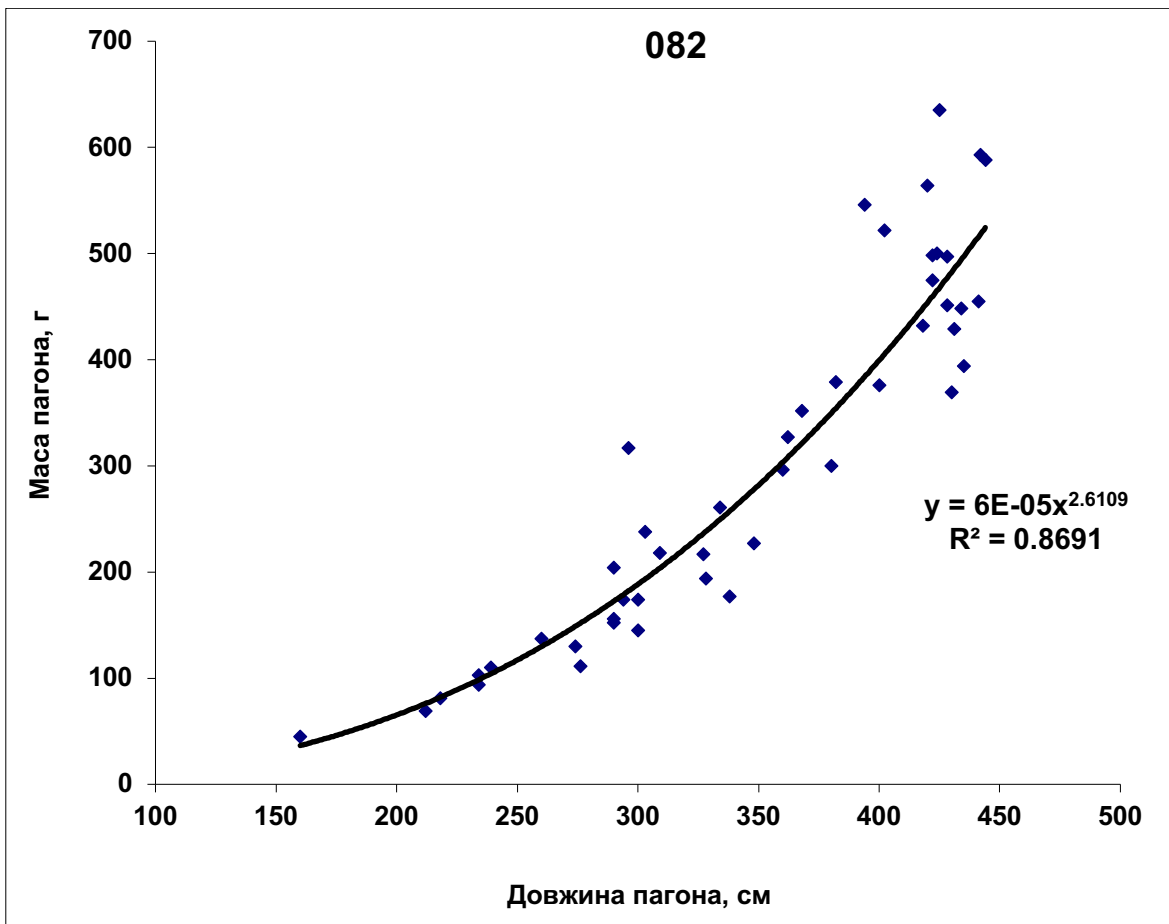
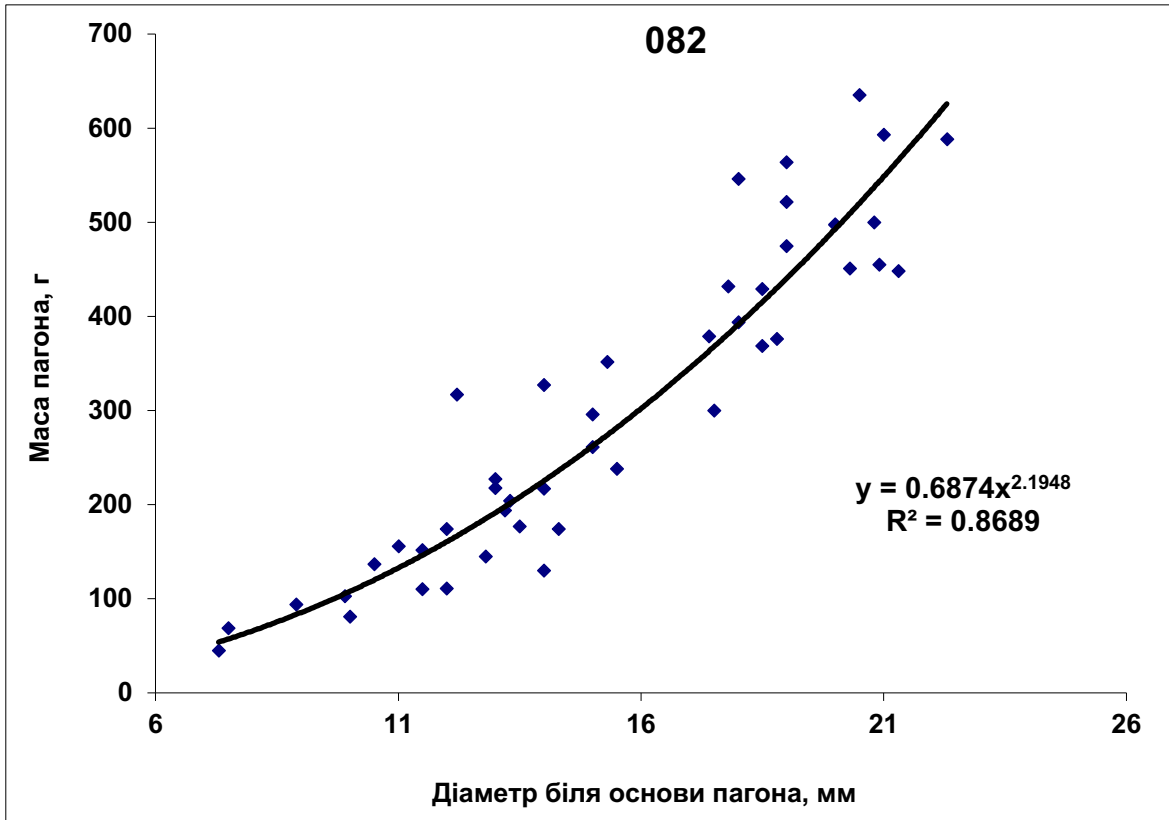


Додаток А.3 Кореляційна матриця та графіки взаємозв'язків між біометричними показниками трирічних пагонів верби прутovidної сорту 082 (Дослідне поле ІБКіЦБ, 2024 р.)

| | Довжина пагона | Діаметр посередині пагона | Діаметр біля основи пагона |
|----------------------------|----------------|---------------------------|----------------------------|
| Довжина пагона | 1 | | |
| Діаметр посередині пагона | 0,86 | 1 | |
| Діаметр біля основи пагона | 0,96 | 0,88 | 1 |
| Маса 1 пагона | 0,92 | 0,94 | 0,93 |

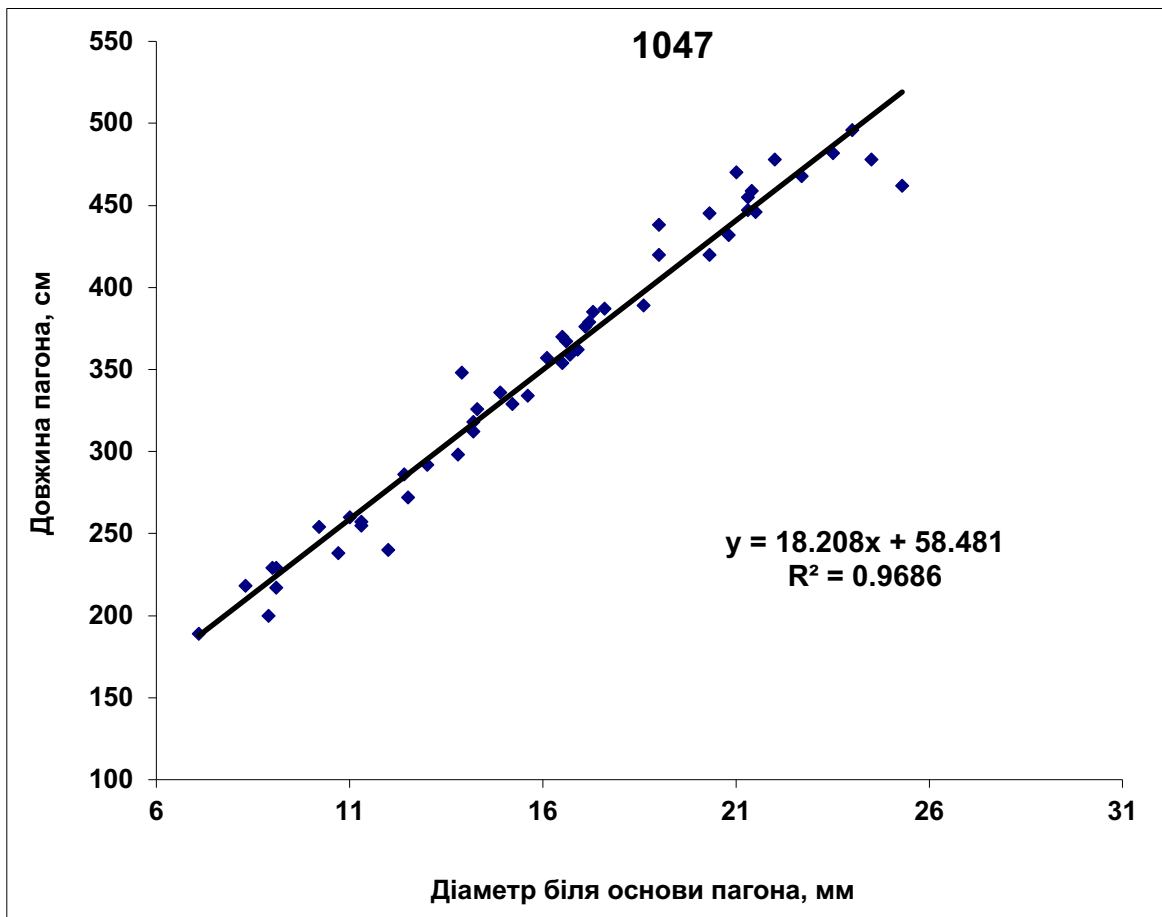


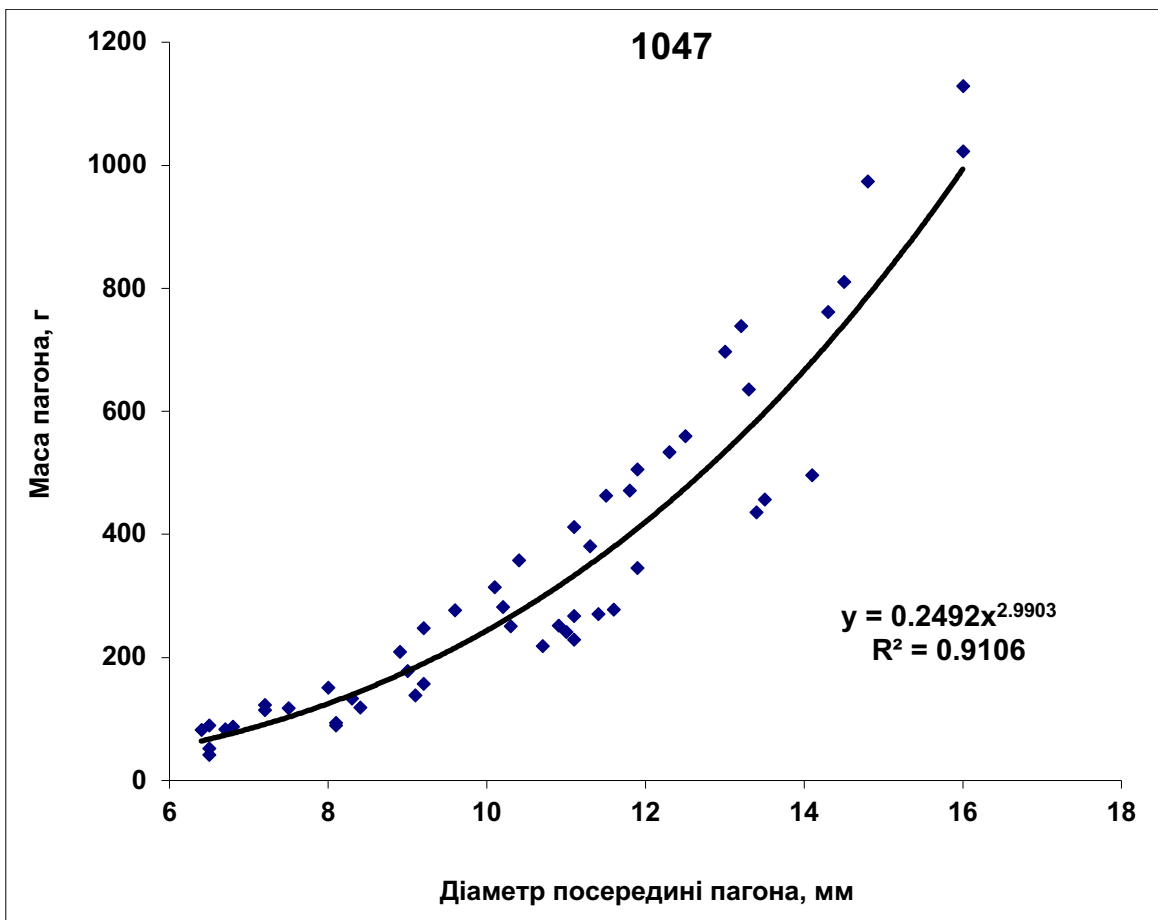
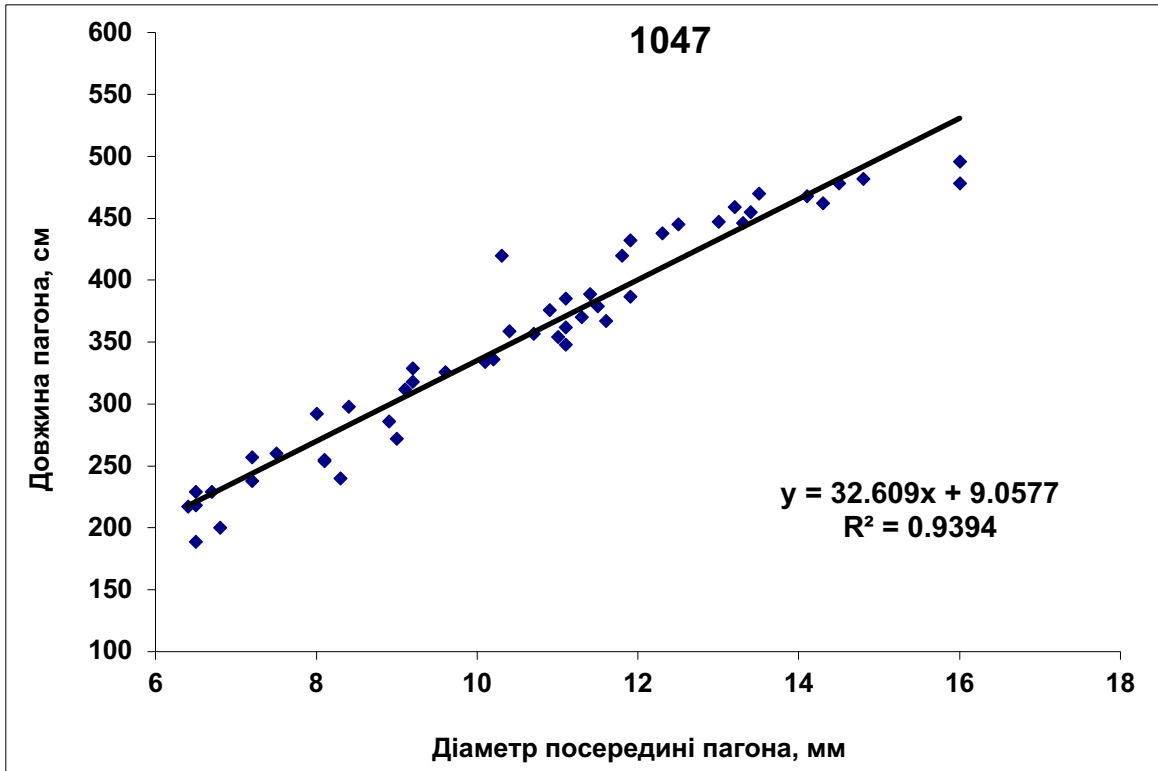


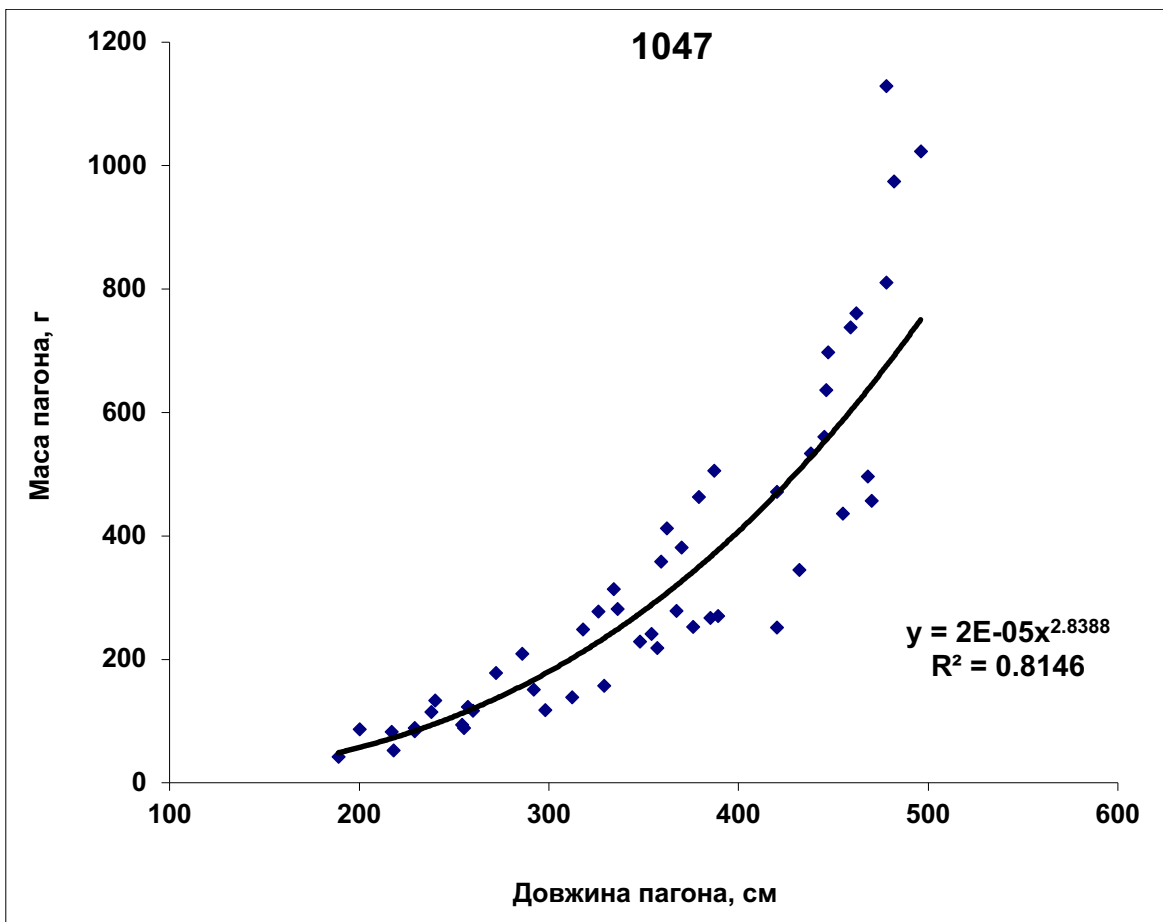
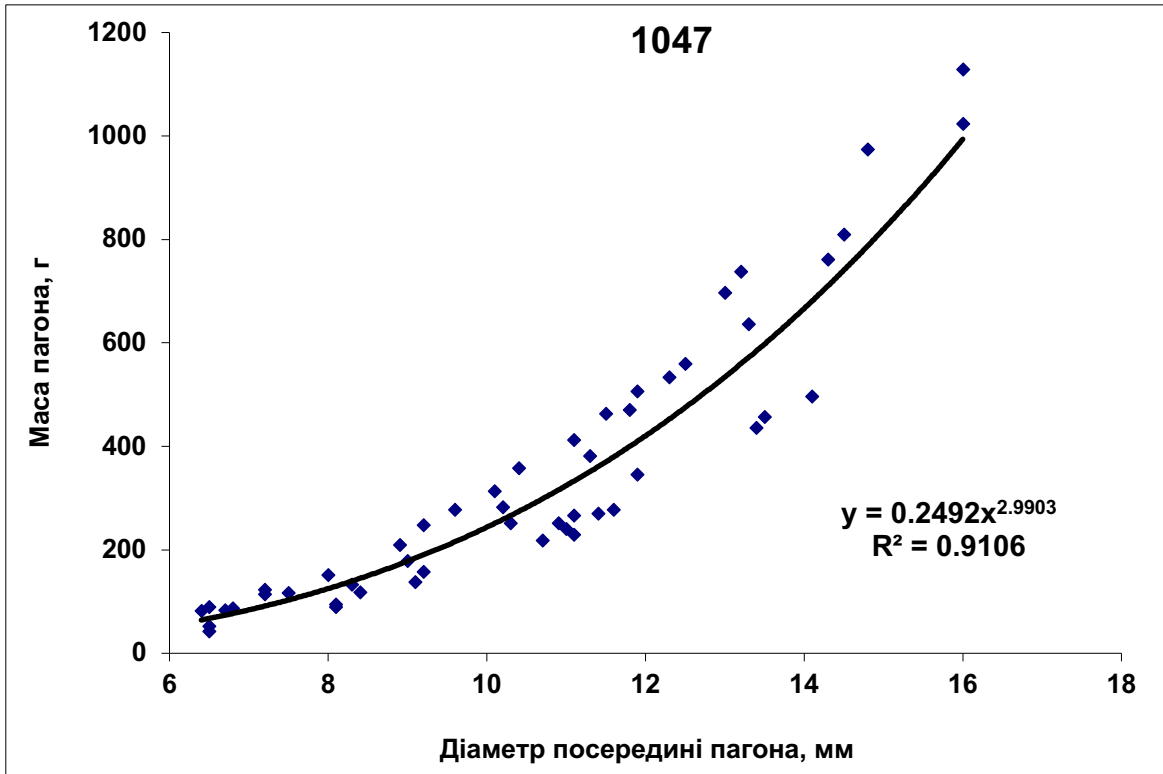


Додаток А.4 Кореляційна матриця та графіки взаємозв'язків між біометричними показниками трирічних пагонів верби прутувидної сорту 1047 (Дослідне поле ІБКіЦБ, 2024 р.)

| | Довжина пагона | Діаметр посередині пагона | Діаметр біля основи пагона |
|----------------------------|----------------|---------------------------|----------------------------|
| Довжина пагона | 1 | | |
| Діаметр посередині пагона | 0,97 | 1 | |
| Діаметр біля основи пагона | 0,98 | 0,97 | 1 |
| Маса 1 пагона | 0,86 | 0,91 | 0,88 |







Додаток А.5 Кореляційна матриця та графіки взаємозв'язків між біометричними показниками трирічних пагонів верби прутovidної сорту 1057 (Дослідне поле ІБКіЦБ, 2024 р.)

| | Довжина пагона | Діаметр посередині пагона | Діаметр біля основи пагона |
|----------------------------|----------------|---------------------------|----------------------------|
| Довжина пагона | 1 | | |
| Діаметр посередині пагона | 0,98 | 1 | |
| Діаметр біля основи пагона | 0,98 | 0,97 | 1 |
| Маса 1 пагона | 0,95 | 0,96 | 0,95 |

