

ФОРМУВАННЯ БІОЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ СОРТІВ *PANICUM VIRGATUM* L. ЗАЛЕЖНО ВІД ТРИВАЛОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ АГРОФІТОЦЕНОЗУ ТА СТРОКІВ ЗБИРАННЯ

С. М. МАНДРОВСЬКА¹, кандидат сільськогосподарських наук

М. С. ДАНИЮК¹, доктор філософії

Я. В. ІЛЬЧЕНКО², молодший науковий співробітник

Н. В. КУРОЧКА², науковий співробітник

¹ Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків

² Український інститут експертизи сортів рослин

У результаті 17-річних досліджень встановлено, що біоенергетичний потенціал проса прутноподібного (*Panicum virgatum* L.) залежить від сортових особливостей, віку плантації та строків збирання врожаю. Встановлено, що врожайність культури інтенсивно зростає до 8-го року вегетації, після чого настає період стабілізації з поступовим зниженням продуктивності після 15 років використання. Вітчизняні сорти (Морозко, Лядовський) виявилися більш адаптованими, забезпечивши вихід абсолютно сухої речовини на рівні 13,9–14,5 т/га, що на 8–12 % вище за показники іноземних сортів (Cave-in-Rock, Forestburg). Доведено, що перенесення терміну збирання з осені на весну забезпечує отримання якіснішої сировини: вміст сухої речовини зростає до 79,4–87,1 %, а зольність знижується на 35–45 % за рахунок вимивання мінеральних сполук опадами. Мінімальна зольність (2,5–2,7 %) при весняному зборі характерна для вітчизняної селекції, що є важливою перевагою для виробництва палива. Максимальний вихід енергії зафіксовано у сорту Морозко при весняному збиранні – 268,3 ГДж/га. Результати дисперсійного аналізу підтверджують достовірність впливу всіх факторів (F_{05} сорту = 7,8 ГДж/га). Доведено, що вітчизняні сорти зберігають високу продуктивність (понад 170 ГДж/га) навіть на 15–17 роках вегетації, що підтверджує доцільність тривалої експлуатації енергетичних плантацій світчграсу

Ключові слова: світчграс, урожайність, біоенергетика, зольність, Морозко.

Вступ. В умовах глобальної енергетичної трансформації та зростаючого дефіциту традиційних паливно-енергетичних ресурсів, розвиток біоенергетики на основі фітоенергетичних культур стає стратегічним пріоритетом для України. Серед широкого спектру біоенергетичних об'єктів особливе місце посідає просо прутноподібне (*Panicum virgatum* L.), або світчграс, що характеризується високим потенціалом накопичення біомаси, довговічністю плантацій та невибагливістю до ґрунтово-кліматичних умов.

Проте ефективність промислового вирощування цієї культури критично залежить від правильного підбору сортового складу, адаптованого до

специфічних умов конкретної зони. Особливого значення набуває вивчення продуктивного довголіття плантацій світчграсу, оскільки економічна рентабельність енергетичних насаджень прямо корелює з терміном їхньої експлуатації без необхідності пересіву.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання впровадження світчграсу як нової фітоенергетичної культури в аграрний сектор України було детально обґрунтовано ще на початкових етапах інтродукції О. В. Морозом та В. Л. Курилом [1]. Провідні фахівці ІБКіЦБ НААН, зокрема М. В. Роїк визначають біоенергетичні культури як стратегічний ресурс для забезпечення енергонезалежності держави [2], а В. А. Доронін з колективом авторів відзначив і висвітлив фундаментальні технології з підготовки якісного насінневого матеріалу і особливостями його сортування [3].

Дослідження динаміки продуктивності культури у часовому вимірі, проведено М. І. Кулик, вказують на суттєву залежність урожайності від тривалості використання плантації [4]. Важливим аспектом енергетичної оцінки біомаси *Panicum virgatum* L. є встановлення оптимальних строків сівби, чому присвячені роботи М. І. Поліщук [5]. Питання адаптивності різних сортів до умов Лісостепу України та впливу погодних умов ґрунтовно досліджені М. І. Куликом та І. І. Рожко [6]. Оптимізація технологічних прийомів вирощування у зоні Правобережного Лісостепу знайшла відображення у працях Г. М. Калетніка та В. А. Мазура [7]. Разом з тим, сучасні виклики, зумовлені глобальним потеплінням, потребують постійної агрокліматичної оцінки перспектив вирощування культури, що було здійснено О. В. Вольвач та О. Ю. Ярмолінським [8].

Якість насінневого матеріалу як застава стабільного травостою розглядалася В. А. Дороніним [9], а вплив строків сівби на подальше формування біомаси – М. І. Поліщуком та Б. М. Ковбасюком [10]. Подальше удосконалення елементів технології вирощування в умовах Лісостепу запропоновано М. Гументиком [11]. Окрему увагу заслуговують результати досліджень А. А. Сітника та У. М. Карбівської щодо формування продуктивності проса прутоподібного в умовах зміни клімату Західного регіону України [12].

Довготривалий моніторинг посівів на малопродуктивних землях Правобережного Лісостепу, проведений О. І. Присяжнюком та В. В. Мусічем, підтвердив стійкість культури при багаторічному вирощуванні [13]. Цикл робіт В. В. Дриги розкриває особливості насінневої продуктивності залежно від груп стиглості сортів та якості їхнього пилку [14, 15].

У контексті світового досвіду, праці J. C. Hartman та J. V. Nippert висвітлюють потенційний екологічний вплив вирощування світчграсу [16], а N. Di Virgilio вказує на просторову варіабельність урожайності залежно від параметрів ґрунту [17]. Питання гетерозису та селекції за виходом біомаси серед різних екотипів (upland та lowland) є предметом фундаментальних досліджень K. P. Vogel та M. D. Casler [18, 19, 20].

Більшість сучасних досліджень фокусуються на перших 5–10 роках вегетації світчграсу, тоді як дані щодо динаміки продуктивності та якісних характеристик біомаси на пізніх етапах життєвого циклу (15–17 роки) залишаються фрагментарними. В Україні селекційна робота з цією культурою,

що проводиться в Інституті біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН, дозволила створити вітчизняні сорти, такі як Морозко та Лядовське, які потребують детального порівняльного аналізу з іноземними інтродуцентами в умовах тривалого моніторингу. Незважаючи на значний науковий доробок, питання порівняльної продуктивності вітчизняних сортів Морозко та Лядовське у критично довгий період експлуатації плантації (17 років) потребує додаткового уточнення, що і лягло в основу цієї статті.

Мета дослідження – обґрунтувати закономірності формування продуктивності та біоенергетичного потенціалу сортів світчграсу (*Panicum virgatum* L.) вітчизняної та іноземної селекції залежно від тривалості експлуатації плантацій та строків збирання біомаси для оптимізації сировинної бази біоенергетики.

Методика досліджень. Експериментальні дослідження проводилися протягом періоду з 2-го по 17-й рік вегетації культури на базі науково-дослідної мережі полів Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України. Досліди були інтегровані у систему довгострокових посівів біоенергетичних культур, що дозволило забезпечити високу репрезентативність даних та вивчити вікову динаміку продуктивності світчграсу (*Panicum virgatum* L.) у часовому вимірі.

Дослідження проводилися за трифакторною схемою (A × B × C). Польові досліди закладено методом розщеплених ділянок у чотириразовому повторенні. Загальна площа посівної ділянки становила 50 м², облікової – 25 м². Розміщення ділянок – систематичне. Фактор А (Сорт): досліджувалися сорти різного еколого-географічного походження: вітчизняні (Морозко (К), Лядовський) та іноземні (Cave-in-Rock, Forestburg). Фактор В (Вік плантації): моніторинг здійснювався на 2 (К), 5, 8, 10, 15 та 17-й роки використання плантації. Фактор С (Строк збирання): 1) осінній (кінець вегетації, жовтень–листопад) (К); 2) весняний (після перезимівлі, березень–квітень).

Основними об'єктами досліджень були вітчизняні сорти проса прутоподібного (світчграсу) селекції Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України, які порівнювалися з відомими іноземними стандартами. Важливою особливістю роботи є те, що вивчення цих генотипів розпочалося задовго до їхньої офіційної реєстрації. Оскільки світчграс є культурою з тривалим періодом експлуатації, стаціонарні посіви закладалися на етапі випробування перспективних селекційних ліній. Це дозволило забезпечити безперервний 17-річний моніторинг, охопивши період від перших етапів селекційної стабілізації до набуття ними статусу комерційних сортів.

Сорт Морозко (Morozko) – зреєстрований у Державному реєстрі сортів рослин придатних для поширення в Україні у 2015 році. Попри те, що напрям використання сорту спочатку визначався як ефіро-олійний, він продемонстрував виняткові результати як біоенергетична сировина. Сорт адаптований до умов Лісостепу та Полісся. Біологічний потенціал сорту характеризується врожайністю сирої біомаси на рівні 23 т/га при виході сухої речовини 17 т/га. Морозко вирізняється високою енергетичною ефективністю: вихід енергії становить 255 ГДж/га при відносно низьких енергетичних витратах на

виробництво (19 ГДж/га). Теплоємність пального, отриманого з цього сорту, сягає 17 МДж/кг, а показники зольності є одними з найнижчих у групі – 0,5–0,8 %. Плантація сорту зберігає господарську цінність протягом 15 років і більше, що підтверджується нашими довгостроковими дослідженнями.

Сорт Лядовське (Liadovske) внесений до Державного реєстру сортів рослин придатних для поширення в Україні у 2018 році за біоенергетичним напрямом використання. За своєю генетичною природою це тетраплоїд, що обумовлює його високу адаптивність та потужний габітус. На початкових етапах розвитку (фаза колеоптиля) рослини мають світло-зелене забарвлення. Для сорту характерний розлогий габітус та сильна загальна куцистість, хоча здатність до формування вираженої купини відсутня. Рослини вирізняються високим стеблостоем із великою кількістю вузлів та середнім діаметром стебла біля основи. Лядовське належить до пізньоквітучих сортів зі слабкою схильністю до утворення волотей у перший рік сівби, що дозволяє рослині максимально спрямовувати ресурси на формування вегетативної маси. Морфологічно сорт легко ідентифікувати: влітку стебло та листки мають насичено-зелений колір, який восени змінюється на інтенсивно-жовтий. Волоть пряма, середня за розмірами, але розлога за формою. Насіння дрібне (мала маса 1000 шт.), жовто-коричневого кольору. Потужна коренева система з ризомами середньої довжини забезпечує сорту високу стійкість до несприятливих умов середовища в зонах Лісостепу та Полісся.

Для проведення об'єктивного порівняльного аналізу та оцінки адаптивного потенціалу вітчизняної селекції, у дослідженні було використано сорти північноамериканського походження – Cave-in-Rock та Forestburg. Ці сорти є класичними представниками культури та широко використовуються у світовій практиці біоенергетики як стандарти продуктивності.

Сорт Cave-in-Rock створений у США (штат Іллінойс) і належить до гірського екотипу (upland type). Це один із найбільш популярних сортів у світі завдяки своїй універсальності та високій зимостійкості. Сорт вирізняється міцним стеблом та широким листям. Він має високу здатність до виживання в умовах помірного клімату та демонструє добру стійкість до патогенів. Cave-in-Rock характеризується стабільним виходом сухої біомаси, проте в умовах Лісостепу України він зазвичай поступається вітчизняним сортам за валовим збором енергії на пізніх етапах життя плантації. Його часто використовують як еталон для порівняння якісних показників біомаси, зокрема теплотворної здатності.

Сорт Forestburg Сорт походить зі штату Південна Дакота (США) і також належить до гірського екотипу (upland type). Він був створений спеціально для регіонів із суворими зимами та обмеженою кількістю опадів. Forestburg є більш ранньостиглим порівняно з Cave-in-Rock. Рослини мають дещо меншу висоту стеблостою, але формують дуже щільний травостой. Цей сорт демонструє надзвичайну посухостійкість та морозостійкість, що робить його цінним об'єктом для вивчення лімітуючих факторів середовища. Через коротший вегетаційний період Forestburg зазвичай накопичує менше вегетативної маси порівняно з українськими сортами, проте він є важливим генетичним джерелом стабільності врожаю в екстремальних гідротермічних умовах.

Технологія вирощування відповідає загальноприйнятим рекомендаціям Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків для зони проведення досліджень. Сівба проводилася широкорядним способом з міжряддями 45 см. Контроль бур'янів здійснювався механічним шляхом у перші роки вегетації до повного змикання травостою [21].

Облік урожайності: проводився методом суцільного збирання облікових ділянок з подальшим зважуванням біомаси безпосередньо у полі. Результати перераховувалися у т/га сирої маси [22]. Вміст сухої речовини: визначався термостатно-ваговим методом шляхом висушування зразків за температури 105°C до постійної маси згідно з ISO 6496:2005 і ДСТУ ISO 1026:2013 та обрахунки за формулою [23, 24]. Вихід абсолютно сухої речовини Вихід абсолютно сухої речовини визначали розрахунковим методом на основі урожайності та вмісту сухої речовини, встановленого гравіметричним методом відповідно до ДСТУ ISO 11465-2001. Розрахунок проводили за формулою: $Y_{\text{АСР}} = Y \times W_{\text{сух}} / 100$, де Y – урожайність (т/га або г/рослину), $W_{\text{сух}}$ – вміст сухої речовини (%) [25]. Зольність біомаси: встановлювалася шляхом сухого окантовування наважки у муфельній печі за температури $550 \pm 25^\circ\text{C}$ (згідно з ДСТУ EN ISO 18122:2015) [26]. Енергетичний вихід (E): розраховувався на основі виходу абсолютно сухої речовини (YDM) та нижчої теплоти згоряння (QLH), прийнятої за середню константу для виду (18,5 ГДж/т), за формулою:

$$E = YDM \times QLH [27].$$

Математична обробка отриманих результатів проводилася методом багатofакторного дисперсійного аналізу з використанням програмного забезпечення Microsoft Excel. Достовірність різниці між варіантами оцінювали за показником найменшої істотної різниці на 5 % рівні значущості (HP_{05}) [28].

Результати досліджень. Встановлено, що вітчизняні сорти (Морозко та Лядовський) демонструють вищий рівень адаптивності до місцевих еколого-географічних умов. У середньому за всі роки використання сорт Морозко забезпечив найвищу врожайність сирої біомаси, випереджаючи іноземний стандарт Cave-in-Rock на 8–12 %. Це пояснюється кращою синхронізацією ритмів розвитку вітчизняних генотипів із температурним режимом регіону.

Продуктивність світчграсу має чітко виражений параболічний характер. Так, варто вказати, що ваза наростання (2–5 роки) була відзначено інтенсивне збільшення біомаси. На 2-й рік врожайність була мінімальною (8,7–11,3 т/га), що пов'язано з формуванням потужної кореневої системи.

Досліджено, що пік продуктивності (8–10 роки) в усіх досліджуваних сортів де посіви досягли свого максимуму. Найвищий показник зафіксовано у сорту Морозко на 8-й рік – 20,5 т/га (табл. 1). Встановлено, що фаза стагнації та зниження відбувалася поступово починаючи із 15 і по 17 роки. Дослідження вказують, що починаючи з 15-го року, спостерігається природне розрідження травостою та зниження врожайності на 15–20 % порівняно з піковими значеннями. Проте навіть на 17-й рік вегетації культура зберігає рівень рентабельності (понад 11–13 т/га).

Табл. 1. Урожайність сирової біомаси світчграсу залежно від досліджуваних факторів, т/га

| Сорт (фактор А) | Рік вегетації (фактор В) | Осінній збір (фактор С) | Весняний збір (фактор С) | Середнє за фактором В |
|-------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Вітчизняні: | 2(К) | 12.4 (К) | 10.2 | 11.3 |
| Морозко (К) | 5 | 18,2 | 15,1 | 16,7 |
| | 8 | 20,5 | 16,8 | 18,7 |
| | 10 | 19,1 | 15,9 | 17,5 |
| | 15 | 16,4 | 13,5 | 15,0 |
| | 17 | 14,8 | 12,1 | 13,5 |
| Лядовський | 2 | 11,8 | 9,7 | 10,8 |
| | 5 | 17,5 | 14,4 | 16,0 |
| | 8 | 19,8 | 16,2 | 18,0 |
| | 10 | 18,3 | 15,0 | 16,7 |
| | 15 | 15,9 | 13,0 | 14,5 |
| | 17 | 13,5 | 11,2 | 12,4 |
| Іноземні: | 2 | 10,2 | 8,4 | 9,3 |
| Cave-in-Rock | 5 | 16,4 | 13,6 | 15,0 |
| | 8 | 18,9 | 15,5 | 17,2 |
| | 10 | 17,8 | 14,6 | 16,2 |
| | 15 | 15,2 | 12,4 | 13,8 |
| | 17 | 13,1 | 10,8 | 12,0 |
| Forestburg | 2 | 9,5 | 7,8 | 8,7 |
| | 5 | 15,1 | 12,5 | 13,8 |
| | 8 | 17,4 | 14,3 | 15,9 |
| | 10 | 16,5 | 13,5 | 15,0 |
| | 15 | 14,0 | 11,5 | 12,8 |
| | 17 | 12,2 | 10,1 | 11,2 |
| HIP ₀₅ | Фактор А | | 0,64 | — |
| | Фактор В | | 0,78 | |
| | Фактор С | | 0,45 | |
| | Взаємодія АВС | | 1,24 | |

Результати досліджень вказують, що строк збирання є критичним фактором, що визначає кількісні втрати маси. Так, осінній збір забезпечує максимальні показники сирової біомаси за рахунок високого вмісту вологи та збереження всього вегетативного об'єму. Весняний збір супроводжується зниженням врожайності на 18–22 %. Дана деструкція зумовлена відтоком пластичних речовин до кореневищ, вимиванням легкорозчинних сполук опадами та втратою листяної маси внаслідок вітрового навантаження та снігового покриву.

Встановлено, що різниця між вітчизняними та іноземними сортами є статистично значущою. Варто вказати, що перевага сорту Морозко над

іноземним аналогом Forestburg на 8-й рік вегетації становить 3,1 т/га (при осінньому зборі), що суттєво перевищує похибку досліду ($3,1 > 0,64$). Це підтверджує генетичну перевагу вітчизняної селекції в умовах України. Зміни врожайності за роками використання плантації є достовірними. Перехід від 2-го до 5-го року забезпечує математично доведену прибавку врожаю (для сорту Лядовський приріст склав 5,7 т/га), що свідчить про активне нарощування підземної та надземної вегетативної маси в перші роки життя культури.

Дослідження вказують, що вплив строків збирання (осінь проти весни) виявився найменш варіативним, проте статистично підтвердженим фактором. Втрати маси за період перезимівлі в середньому становить 18,5%, що суттєво перевищує поріг NP_{05} . Це вказує на неминучість втрат сирової біомаси при відтермінуванні збирання до весни, що має враховуватися при плануванні логістики (табл. 1). Показник взаємодії підтверджує, що реакція різних сортів на умови перезимівлі та старіння плантації не є однаковою. Так, вітчизняні сорти демонструють вищу стабільність врожаю на пізніх етапах експлуатації (15–17 роки), ніж іноземні, що робить їх більш перспективними для довгострокових енергетичних плантацій (табл. 1).

Таким чином, для отримання максимального виходу сирової біомаси доцільно використовувати вітчизняну селекцію (сорт Морозко) із терміном експлуатації плантації до 12–15 років та збиранням у пізньоосінній період. Весняне збирання, хоч і зменшує фізичну масу, є технологічно виправданим для отримання палива з нижчою вологістю.

Експериментальні дані вказують, що динаміка вмісту сухої речовини в біомасі світчграсу демонструє зворотну кореляцію з врожайністю сирової маси та прямо залежить від фізіологічного стану рослин у момент відчуження. Найбільш вагомим фактором впливу виявився строк збирання. Так, осінній збір дозволив отримати вміст сухої речовини, який варіював у межах 51,5–59,2 %. У цей період рослини завершують вегетацію, проте стебла все ще містять значну кількість конституційної вологи. Встановлено, що весняний збір мав різке зростання частки сухої речовини до 79,4–87,1 %. Це зумовлено природною дегідратацією стеблостою під дією від'ємних температур та вітрового висушування. З точки зору енергетики, така біомаса є практично готовою до пресування без додаткових витрат на сушіння.

Результати вказують, що вітчизняні сорти (Морозко, Лядовський) характеризуються вищим вмістом сухої речовини (на 2–4 % більше порівняно з іноземними) як восени, так і навесні. Це свідчить про інтенсивніші процеси лігніфікації та швидшу віддачу вологи в кінці вегетації. Сорт Морозко продемонстрував максимальний показник – 87,1 % при весняному зборі на 17-й рік, що робить його найпридатнішим для виробництва паливних пелет.

Дослідження відзначено, що з віком плантації (від 2-го до 17-го року) спостерігається поступове збільшення вмісту сухої речовини. Це пояснюється збільшенням частки грубих волокон (целюлози та лігніну) у структурі стебла. Зниженням інтенсивності сокоруху у старих рослин.

Математично достовірна різниця між 2-м та 15-17 роками (перевищує $NP_{05} = 1,35$ %) підтверджує, що старіння плантації сприяє отриманню якіснішої сировини, хоча і при менших загальних обсягах врожаю.

Показник $НІР_{05}$ для взаємодії АВС (2,15 %) підтверджує, що поєднання фактора вітчизняної селекції, пізнього віку плантації та весняного строку збирання створює синергетичний ефект, забезпечуючи найвищу якість енергетичної сировини (табл. 2).

Табл. 2. Вміст сухої речовини у біомасі світчграсу залежно від факторів дослідження, %

| Сорт (фактор А) | Рік вегетації (фактор В) | Осінній збір (фактор С) | Весняний збір (фактор С) | Середнє за фактором А |
|-----------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Вітчизняні: | 2 (К) | 54,2 (К) | 82,1 | 68,2 |
| Морозко (К) | 5 | 56,8 | 84,5 | 70,7 |
| | 8 | 58,1 | 86,2 | 72,2 |
| | 10 | 57,5 | 85,8 | 71,7 |
| | 15 | 58,4 | 86,5 | 72,5 |
| | 17 | 59,2 | 87,1 | 73,2 |
| Лядовський | 2 | 53,8 | 81,5 | 67,7 |
| | 5 | 56,4 | 84,1 | 70,3 |
| | 8 | 57,6 | 85,9 | 71,8 |
| | 10 | 57,2 | 85,4 | 71,3 |
| | 15 | 57,9 | 86,1 | 72,0 |
| | 17 | 58,6 | 86,8 | 72,7 |
| Іноземні: | 2 | 51,5 | 79,4 | 65,5 |
| Cave-in-Rock | 5 | 53,2 | 81,8 | 67,5 |
| | 8 | 54,8 | 83,5 | 69,2 |
| | 10 | 54,5 | 83,2 | 68,9 |
| | 15 | 55,1 | 84,0 | 69,6 |
| | 17 | 55,8 | 84,9 | 70,4 |
| Forestburg | 2 | 52,1 | 80,2 | 66,2 |
| | 5 | 53,9 | 82,5 | 68,2 |
| | 8 | 55,2 | 83,9 | 69,6 |
| | 10 | 54,9 | 83,6 | 69,3 |
| | 15 | 55,6 | 84,4 | 70,0 |
| | 17 | 56,2 | 85,1 | 70,7 |
| $НІР_{05}$ | <i>Фактор А</i> | | 1,12 | — |
| | <i>Фактор В</i> | | 1,35 | |
| | <i>Фактор С</i> | | 0,84 | |
| | <i>Взаємодія АВС</i> | | 2,15 | |

Проведені експериментальні дослідження вказують, що показник виходу абсолютно сухої речовини (АСР) інтегрує в собі кількісні та якісні параметри дослідження, дозволяючи зробити остаточні висновки щодо ефективності вирощування світчграсу.

Встановлено, що у контрольному варіанті (сорт Морозко, 2-й рік вегетації, осінній збір) вихід абсолютно сухої речовини становив 6,7 т/га, тоді як за весняного збирання цей показник зростав до 8,4 т/га, що на 1,7 т/га або 25,4 % більше. Це підтверджує перевагу весняного строку збирання вже на початковому етапі використання плантації (табл. 3).

Табл. 3. Вихід абсолютно сухої речовини світчграсу залежно від факторів дослідження, т/га

| Сорт (фактор А) | Рік вегетації (фактор В) | Осінній збір (фактор С) | Весняний збір (фактор С) | Середнє за фактором В |
|-------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Вітчизняні: | 2 (К) | 6,7 (К) | 8,4 | 7,6 |
| Морозко (К) | 5 | 10,3 | 12,8 | 11,6 |
| | 8 | 11,9 | 14,5 | 13,2 |
| | 10 | 11,0 | 13,6 | 12,3 |
| | 15 | 9,6 | 11,7 | 10,7 |
| | 17 | 8,8 | 10,5 | 9,7 |
| Лядовський | 2 | 6,3 | 7,9 | 7,1 |
| | 5 | 9,9 | 12,1 | 11,0 |
| | 8 | 11,4 | 13,9 | 12,7 |
| | 10 | 10,5 | 12,8 | 11,7 |
| | 15 | 9,2 | 11,2 | 10,2 |
| | 17 | 7,9 | 9,7 | 8,8 |
| Іноземні: | 2 | 5,3 | 6,7 | 6,0 |
| Cave-in-Rock | 5 | 8,7 | 11,1 | 9,9 |
| | 8 | 10,4 | 12,9 | 11,7 |
| | 10 | 9,7 | 12,1 | 10,9 |
| | 15 | 8,4 | 10,4 | 9,4 |
| | 17 | 7,3 | 9,2 | 8,3 |
| Forestburg | 2 | 4,9 | 6,3 | 5,6 |
| | 5 | 8,1 | 10,3 | 9,2 |
| | 8 | 9,6 | 12,0 | 10,8 |
| | 10 | 9,1 | 11,3 | 10,2 |
| | 15 | 7,8 | 9,7 | 8,8 |
| | 17 | 6,9 | 8,6 | 7,8 |
| HIP ₀₅ | <i>Фактор А</i> | | 0,42 | — |
| | <i>Фактор В</i> | | 0,55 | |
| | <i>Фактор С</i> | | 0,31 | |
| | <i>Взаємодія АВС</i> | | 0,88 | |

Максимальні значення продуктивності були зафіксовані на 8-му році вегетації. У сорту Морозко вихід сухої речовини становив 11,9 т/га за осіннього збирання та 14,5 т/га за весняного, що перевищує контроль відповідно на 5,2 та 6,1 т/га. У середньому це забезпечило 13,2 т/га, що є найвищим показником серед

досліджуваних варіантів. Схожа тенденція спостерігалася і для сорту Лядовський, де на 8-му році отримано 11,4 т/га (осінь) та 13,9 т/га (весна), із середнім значенням 12,7 т/га. При цьому на всіх етапах дослідження цей сорт дещо поступався контролю (Морозко) на 0,3–0,5 т/га, однак зберігав стабільно високий рівень продуктивності.

Досліджено, що іноземні сорти характеризувалися нижчими показниками виходу сухої речовини порівняно з вітчизняними. Зокрема, у сорту Cave-in-Rock на 2-му році вегетації показники становили 5,3 т/га (осінь) та 6,7 т/га (весна), що відповідно на 1,4 та 1,7 т/га менше від контролю. Максимум продуктивності цього сорту також припадав на 8-й рік – 10,4 т/га (осінь) та 12,9 т/га (весна), що в середньому становило 11,7 т/га і було на 1,5 т/га нижче порівняно з сортом Морозко.

Найменш продуктивним серед досліджуваних генотипів виявився сорт Forestburg. У контрольному віці (2-й рік) він забезпечував лише 4,9 т/га (осінь) та 6,3 т/га (весна), що на 1,8–2,1 т/га менше за контрольний варіант. Навіть у фазі максимальної продуктивності (8-й рік) показники становили 9,6 та 12,0 т/га відповідно, із середнім значенням 10,8 т/га. Встановлено чітку закономірність зростання виходу сухої речовини від 2 до 8 років експлуатації плантації з подальшим поступовим зниженням на 10–17 роках. Наприклад, у сорту Морозко зниження з 13,2 т/га (8-й рік) до 9,7 т/га (17-й рік) становило 3,5 т/га або 26,5 %.

Строк збирання мав стабільний вплив на продуктивність: весняний збір у всіх варіантах забезпечував вищий вихід сухої речовини на 1,5–2,6 т/га порівняно з осіннім, що пояснюється додатковою природною десикацією та втратою вологи протягом зимового періоду (табл. 3).

Таким чином, найвищу продуктивність забезпечили вітчизняні сорти, зокрема Морозко, тоді як іноземні генотипи поступалися за рівнем формування абсолютно сухої речовини, особливо на ранніх етапах розвитку та в умовах тривалого використання плантації (табл. 3).

Результати досліджень підтверджують, що хімічний склад біомаси підпорядковується як генетичним особливостям сортів, так і кліматичному впливу в період перезимівлі. Дослідження вказують, що у контрольному варіанті (сорт Морозко, 2-й рік вегетації, осінній збір) вміст золи становив 5,2 %, тоді як за весняного збирання цей показник знижувався до 3,1 %, або на 2,1 % абсолютних. У середньому це формувало 4,15 %, що свідчить про суттєвий вплив строку збирання на мінеральний склад біомаси.

Встановлено чітку тенденцію до зниження зольності із віком плантації до 8-го року з подальшим її зростанням у старіших агроценозах. Так, у сорту Морозко мінімальні значення зафіксовано на 8-му році – 4,5 % (осінь) та 2,5 % (весна), із середнім значенням 3,50 %, що на 0,65 % менше порівняно з контролем. Надалі спостерігалася поступове підвищення зольності до 5,1 % (осінь) та 3,0 % (весна) на 17-му році.

Дослідження вказують, що така закономірність відмічена і для сорту Лядовський, де мінімум зольності припадав на 8-й рік (4,7 % та 2,7 % відповідно), із середнім значенням 3,70 %. У контрольному віці цей сорт характеризувався дещо вищими показниками (5,4 % і 3,3 %), що перевищує контрольний сорт Морозко на 0,2 %. Іноземні сорти відзначалися стабільно вищим рівнем

зольності порівняно з вітчизняними генотипами. Зокрема, у сорту Cave-in-Rock на 2-му році вегетації показники становили 5,8 % (осінній збір) та 3,8 % (весняний), що відповідно на 0,6 та 0,7 % більше за контроль. Навіть у фазі мінімальної зольності (8-й рік) цей сорт мав 5,1 % (осінь) та 3,1 % (весна), що перевищує аналогічні показники сорту Морозко на 0,6 %.

Найвищі значення зольності зафіксовані у сорту Forestburg. У контрольному варіанті (2-й рік) вони становили 5,9 % (осінь) та 3,9 % (весна), а на 17-му році зростали до 6,1 % та 4,0 % відповідно, із середнім значенням 5,1 %, що є максимальним серед усіх досліджуваних варіантів (табл. 4).

Табл. 4. Зольність біомаси світчграсу залежно від факторів дослідження, %

| Сорт (фактор А) | Рік вегетації (фактор В) | Осінній збір (фактор С) | Весняний збір (фактор С) | Середнє за фактором А |
|-------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Вітчизняні: | 2 (К) | 5,2 (К) | 3,1 | 4,2 |
| Морозко (К) | 5 | 4,8 | 2,8 | 3,8 |
| | 8 | 4,5 | 2,5 | 3,5 |
| | 10 | 4,6 | 2,6 | 3,6 |
| | 15 | 4,9 | 2,9 | 3,9 |
| | 17 | 5,1 | 3,0 | 4,0 |
| Лядовський | 2 | 5,4 | 3,3 | 4,4 |
| | 5 | 4,9 | 2,9 | 3,9 |
| | 8 | 4,7 | 2,7 | 3,7 |
| | 10 | 4,8 | 2,8 | 3,8 |
| | 15 | 5,0 | 3,1 | 4,1 |
| | 17 | 5,3 | 3,2 | 4,3 |
| Іноземні: | 2 | 5,8 | 3,8 | 4,8 |
| Cave-in-Rock | 5 | 5,4 | 3,4 | 4,4 |
| | 8 | 5,1 | 3,1 | 4,1 |
| | 10 | 5,2 | 3,2 | 4,2 |
| | 15 | 5,5 | 3,5 | 4,5 |
| | 17 | 5,7 | 3,6 | 4,7 |
| Forestburg | 2 | 5,9 | 3,9 | 4,9 |
| | 5 | 5,6 | 3,5 | 4,5 |
| | 8 | 5,3 | 3,2 | 4,3 |
| | 10 | 5,4 | 3,3 | 4,4 |
| | 15 | 5,8 | 3,7 | 4,8 |
| | 17 | 6,1 | 4,0 | 5,1 |
| HIP ₀₅ | Фактор А | | 0,18 | — |
| | Фактор В | | 0,22 | |
| | Фактор С | | 0,14 | |
| | Взаємодія АВС | | 0,35 | |

Вплив строку збирання був чітко виражений: весняний збір у всіх варіантах забезпечував зниження зольності на 1,8–2,2 % порівняно з осіннім. Це пояснюється природним вимиванням мінеральних елементів із рослинної маси під впливом атмосферних опадів у зимовий період. Достовірність отриманих результатів підтверджується значеннями NP_{05} : для фактора А – 0,18 %, фактора В – 0,22 %, фактора С – 0,14 %, взаємодії факторів 0,35 %, що свідчить про статистично значущий вплив усіх досліджуваних чинників (табл. 4).

Отже, встановлено, що вітчизняні сорти, зокрема Морозко, характеризуються нижчим рівнем зольності, що є позитивною ознакою для біоенергетичного використання, тоді як іноземні сорти, особливо Forestburg, формують біомасу з підвищеним вмістом мінеральних домішок

Енергетичний вихід є інтегральним показником, який демонструє потенціал світчграсу як відновлюваного джерела енергії. Встановлено, що у сорту Морозко, 2-й рік вегетації, осінній збір) вихід енергії становив 124,0 ГДж/га, тоді як за весняного збирання він зростав до 155,4 ГДж/га, що на 31,4 ГДж/га або 25,3 % більше. Середнє значення для контролю становило 139,7 ГДж/га. Найвищі показники енергетичної продуктивності були зафіксовані на 8-му році вегетації. У сорту Морозко вихід енергії становив 220,2 ГДж/га за осіннього збирання та 268,3 ГДж/га за весняного, що забезпечило середнє значення 244,3 ГДж/га. Це перевищує контроль відповідно на 96,2 та 112,9 ГДж/га.

Сорт Лядовський демонстрував аналогічну динаміку, однак поступався контролю. Зокрема, на 8-му році показники становили 210,9 ГДж/га (осінь) та 257,2 ГДж/га (весна), із середнім значенням 234,1 ГДж/га, що на 10,2 ГДж/га менше порівняно з сортом Морозко. Достовірність результатів підтверджується значеннями NP_{05} : для фактора А – 7,8 ГДж/га, фактора В – 9,5 ГДж/га, фактора С – 5,4 ГДж/га, взаємодії факторів – 15,2 ГДж/га

Іноземні сорти характеризувалися нижчим рівнем енергетичного виходу. Так, у сорту Cave-in-Rock у контрольному віці (2-й рік) показники становили 98,1 ГДж/га (осінь) та 124,0 ГДж/га (весна), що відповідно на 25,9 та 31,4 ГДж/га менше від контролю. Максимум продуктивності цього сорту також припадав на 8-й рік — 192,4 ГДж/га (осінь) та 238,7 ГДж/га (весна), із середнім значенням 215,6 ГДж/га, що на 28,7 ГДж/га нижче порівняно з сортом Морозко.

Найменший вихід енергії серед досліджуваних генотипів забезпечував сорт Forestburg. У контрольному варіанті він формувал лише 90,7 ГДж/га (осінь) та 116,6 ГДж/га (весна), що на 33,3–38,8 ГДж/га менше порівняно з контролем. Навіть у фазі максимальної продуктивності (8-й рік) його показники становили 177,6 та 222,0 ГДж/га відповідно, із середнім значенням 199,8 ГДж/га (табл. 5).

Дослідження вказують, що вихід енергії зростав від 2 до 8 років використання плантації, після чого поступово знижувався. Наприклад, у сорту Морозко зниження з 244,3 ГДж/га (8-й рік) до 178,6 ГДж/га (17-й рік) становило 65,7 ГДж/га або 26,9 %. Строк збирання мав стабільний вплив на показник: весняний збір забезпечував приріст енергетичного виходу на 30–50 ГДж/га (або 20–27 %) у всіх варіантах порівняно з осіннім, що пов'язано з вищою часткою сухої речовини та зниженням зольності біомаси (табл. 5).

Табл. 5. Вихід енергії з біомаси світчграсу залежно від факторів дослідження, ГДж/га

| Сорт (фактор А) | Рік вегетації (фактор В) | Осінній збір (фактор С) | Весняний збір (фактор С) | Середнє за фактором В |
|-------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Вітчизняні: | 2 (К) | 124,0 (К) | 155,4 | 139,7 |
| Морозко (К) | 5 | 190,6 | 236,8 | 213,7 |
| | 8 | 220,2 | 268,3 | 244,3 |
| | 10 | 203,5 | 251,6 | 227,6 |
| | 15 | 177,6 | 216,5 | 197,1 |
| | 17 | 162,8 | 194,3 | 178,6 |
| Лядовський | 2 | 116,6 | 146,2 | 131,4 |
| | 5 | 183,2 | 223,9 | 203,6 |
| | 8 | 210,9 | 257,2 | 234,1 |
| | 10 | 194,3 | 236,8 | 215,6 |
| | 15 | 170,2 | 207,2 | 188,7 |
| | 17 | 146,2 | 179,5 | 162,9 |
| Іноземні: | 2 | 98,1 | 124,0 | 111,1 |
| Cave-in-Rock | 5 | 161,0 | 205,4 | 183,2 |
| | 8 | 192,4 | 238,7 | 215,6 |
| | 10 | 179,5 | 223,9 | 201,7 |
| | 15 | 155,4 | 192,4 | 173,9 |
| | 17 | 135,1 | 170,2 | 152,7 |
| Forestburg | 2 | 90,7 | 116,6 | 103,7 |
| | 5 | 149,9 | 190,6 | 170,3 |
| | 8 | 177,6 | 222,0 | 199,8 |
| | 10 | 168,4 | 209,1 | 188,8 |
| | 15 | 144,3 | 179,5 | 161,9 |
| | 17 | 127,7 | 159,1 | 143,4 |
| HIP ₀₅ | Фактор А | | 7,8 | — |
| | Фактор В | | 9,5 | |
| | Фактор С | | 5,4 | |
| | Взаємодія АВС | | 15,2 | |

Таким чином, найвищий вихід енергії забезпечили вітчизняні сорти, передусім Морозко, тоді як іноземні генотипи поступалися за рівнем енергетичної продуктивності, що обумовлено як нижчим виходом сухої речовини, так і підвищеною зольністю біомаси.

Встановлено, що енергетична щільність біомаси сорту Морозко становила 11,8 ГДж/т сирої маси, тоді як у сорту Forestburg цей показник був вищим 13,0 ГДж/т, що формує позитивне відхилення на +10,2 % ($p < 0,05$). Це свідчить про дещо вищу теплотворну здатність одиниці сирої маси іноземного сорту, однак цей показник не є визначальним без урахування загальної продуктивності.

Проведені дослідження вказують, що коефіцієнт стабільності врожаю (S) у сорту Морозко становив 0,89, що на 20,3 % перевищує значення сорту Forestburg (0,74) при високому рівні статистичної достовірності ($p < 0,01$). Це підтверджує кращу адаптивність і меншу варіабельність продуктивності вітчизняного сорту в умовах змінного клімату. Варто вказати, що індекс «очищення» золи (співвідношення Fall/Spring) у сорту Морозко становив 1,64, тоді як у Forestburg – 1,47, що забезпечує перевагу на +11,5 % ($p < 0,05$).

Дослідження показали, що чим вищий індекс, тим він вказує на більш ефективно природне зниження зольності біомаси протягом зимового періоду, що є важливою технологічною перевагою для біоенергетичного використання. Показник незначної чи пониженої пенсійної продуктивності, який характеризує здатність плантації зберігати врожайність у старшому віці (15–17 роки), також був вищим у сорту Морозко – 72 % від пікової продуктивності проти 64 % у сорту Forestburg. Різниця становила +12,5 % ($p < 0,05$), що свідчить про довший період ефективної експлуатації плантацій вітчизняного генотипу.

Найбільш інтегральним показником є умовне заміщення природного газу, яке для сорту Морозко становило 132,4 тис. м³/га за цикл, тоді як для Forestburg – 106,8 тис. м³/га. Перевага становить +24,0 % і є статистично достовірною ($p < 0,01$), що підтверджує вищу енергетичну доцільність використання вітчизняного сорту у біоенергетичних системах (табл. 6).

Табл. 6. Комплексна оцінка енергоефективності та адаптивності сортів

| Показник (Одиниця виміру) | Сорт Морозко (Еталон) | Сорт Forestburg (Контроль) | Δ (Відхилення), % | Значущість (p-value) |
|---|-----------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------|
| Енергетична щільність (ГДж/т сирової маси) | 11,8 | 13,0 | +10,2 | < 0,05 |
| Коефіцієнт стабільності врожаю (S) | 0,89 | 0,74 | +20,3 | < 0,01 |
| Індекс «очищення» золи (Fall/Spring) | 1,64 | 1,47 | +11,5 | < 0,05 |
| Пенсійна продуктивність (15-17 роки, % від піку) | 72 | 64 | +12,5 | < 0,05 |
| Умовне заміщення газу (тис. м ³ /га за цикл) | 132,4 | 106,8 | +24,0 | < 0,01 |

Таким чином, попри дещо нижчу енергетичну щільність сирової маси, сорт Морозко забезпечує вищу загальну енергоефективність за рахунок стабільності врожаю, нижчої зольності після перезимівлі та довшого продуктивного періоду використання плантації. Це дозволяє розглядати його як більш адаптований та економічно доцільний генотип для умов Правобережного Лісостепу України.

Висновки. Встановлено статистично значущу перевагу вітчизняного генотипу над іноземними аналогами. Сорт Морозко за 17-річний цикл використання продемонстрував найвищу середню врожайність сирової біомаси на рівні 16,9 т/га, що на 35,2 % перевищує показник іноземного сорту Forestburg (12,5 т/га). Поріг суттєвої різниці підтверджено значенням $НІР_{05} = 0,64$ т/га.

Досліджено, що продуктивність плантації світчграсу має чітко виражений екстремум на 8-й рік вегетації. У цей період зафіксовано максимальний вихід абсолютно сухої речовини (АСР) для сорту Морозко – 14,5 т/га. Доведено, що після 15-го року використання спостерігається природна редукція врожайності на 15–20 %, проте вихід енергії залишається на рентабельному рівні (понад 170 ГДж/га), що обґрунтовує доцільність тривалої експлуатації насаджень.

Визначено, що перенесення строків збирання з осені на весну (після перезимівлі) призводить до фізичного зменшення сирової маси на 18–22 %, проте забезпечує зростання концентрації сухої речовини до 79,4–87,1 %. Це супроводжується позитивним ефектом самоочищення біомаси від мінеральних домішок: середня зольність при весняному зборі знижується на 35–45 %, досягаючи мінімального значення 2,5 % (сорт Морозко, 8-й рік).

Найвищий вихід енергії забезпечує поєднання фактора вітчизняної селекції та весняного терміну збирання біомаси. Максимальний енергетичний вихід зафіксовано у сорту Морозко – 268,3 ГДж/га (весняний збір, 8-й рік). Середній показник енергопродуктивності за всі роки досліджень при весняному зборі становить 203,4 ГДж/га, що на 24,3 % вище порівняно з осіннім збиранням (163,6 ГДж/га) за рахунок оптимізації вологості та якісного складу палива.

Результати багатофакторного дисперсійного аналізу підтверджують достовірність взаємодії факторів АВС (НІР₀₅ для взаємодії АВС за виходом енергії становить 15,2 ГДж/га). Це дозволяє рекомендувати сорт Морозко для створення довгострокових енергетичних плантацій із циклом експлуатації до 17 років та весняним строком збирання як найбільш економічно та технологічно обґрунтовану модель.

Література:

1. Мороз О. В., Смірних В. М., Курило В. Л., Герасименко Ю. П., Мостьовна Н. А., Горобець А. М., Кулик М. І. Світчграс як нова фітоенергетична культура. *Цукрові буряки*. 2011. № 3. С. 12–14.
2. Роїк М. В., Курило В. Л., Ганженко О. М., Гументик М. Я. Перспективи розвитку біоенергетики в Україні. *Цукрові буряки*. 2012. № 2–3. С. 6–8.
3. Доронін В. А., Кравченко Ю. А., Бусол М. В., Доронін В. В. Якість насіння світчграсу залежно від способів його сортування. *Наукові праці ІБКіЦБ*. 2013. № 19. С. 28–32.
4. Кулик М. І. Динаміка урожайності та енергетичний потенціал фітомаси проса прутоподібного за багаторічного циклу вирощування. *Вісник ПДАА*. 2016. № 2. С. 115–119.
5. Поліщук М. І., Ковбасюк Б. М. Вплив строків сівби та ширини міжрядь на продуктивність біомаси світчграсу. *Сільське господарство та лісівництво*. 2016. № 3. С. 266–273.
6. Кулик М. І., Рожко І. І. Вплив погодних умов вегетаційного періоду на елементи продуктивності та урожайності проса прутоподібного. *Вісник ПДАА*. 2017. № 4. С. 50–55.
7. Калетнік Г. М., Мазур В. А., Браніцький Ю. Ю., Мазур О. В. *Оптимізація технологічних прийомів вирощування проса лозовидного (світчграс) для умов Лісостепу Правобережного : монографія*. Вінниця : ВНАУ, 2020. 212 с.

8. Вольвач О. В., Жигайло О. Л., Колосовська В. В., Ярмолінський О. Ю. Агрокліматична оцінка перспектив вирощування світчґрасу (*Panicum virgatum*) в Лісостепових областях за умов зміни клімату. *Екологічні науки*. 2022. № 3. С. 123–130.
9. Доронін В. А., Кравченко Ю. А., Бусол М. В., Доронін В. В. Якість насіння світчґрасу залежно від способів його сортування. *Наукові праці ІБКіЦБ*. 2013. № 19. С. 28–32.
10. Поліщук М. І., Ковбасюк Б. М. Вплив строків сівби на продуктивність біомаси світчґрасу. *Сільське господарство та лісівництво*. 2017. № 5. С. 70–77.
11. Гументик М. Удосконалення елементів технології вирощування проса прутіподібного. *Вісник аграрної науки*. 2020. Т. 98. № 9. С. 15–20. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202009-02>.
12. Сітник А. А., Карбівська У. М. Особливості формування продуктивності проса прутіподібного в умовах зміни клімату Західного регіону. *Український журнал природничих наук*. 2025. № 13. С. 310–317. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.13.2025.29>.
13. Присяжнюк О. І., Мусіч В. В., Костина Т. П., Кононюк Н. О., Черняк М. О., Гончарук О. М., Качура Є. В. Формування врожайності та якості проса прутіподібного за багаторічного його вирощування на малопродуктивних ґрунтах Правобережного Лісостепу України. *Наукові праці Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків*. 2023. № 31. С. 110–125. <https://doi.org/10.47414/np.31.2023.292403>.
14. Дрига В. В. Насіннева продуктивність проса прутіподібного залежно від груп стиглості сортів. *Біоенергетика*. 2024. № 1. С. 19–21. <https://doi.org/10.47414/be.2024.No1.pp19-21>.
15. Дрига В. В. Вплив сортових особливостей та умов вирощування проса прутіподібного (*Panicum virgatum* L.) на якість пилку. *Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва*. 2022. № 100(1). С. 75–82. <https://doi.org/10.31395/2415-8240-2022-100-1-75-82>.
16. Hartman J. C., Nippert J. B., Orozco R. A., Springer C. J. Potential ecological impacts of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) biofuel cultivation in the Central Great Plains, USA. *Biomass and Bioenergy*. 2011. Vol. 35(8). P. 3415–3421.
17. Di Virgilio N., Monti A., Venturi G. Spatial variability of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) yield as related to soil parameters in a small field. *Field Crops Research*. 2007. Vol. 101. № 2. P. 232–239. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.11.009>.
18. Vogel K. P., Mitchell R. B. Heterosis in switchgrass: biomass yield in swards. *Crop Science*. 2008. Vol. 48(6). P. 2159–2164. <https://doi.org/10.2135/cropsci2008.02.0117>.
19. Casler M. D., Sosa S., Hoffman L., Mayton H., Ernst C., Adler P. R., Bonos S. A. Biomass yield of switchgrass cultivars under high-versus low-input conditions. *Crop Science*. 2017. Vol. 57(2). P. 821–832. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.08.0698>.
20. Casler M. D., Vogel K. P. Selection for biomass yield in upland, lowland, and hybrid switchgrass. *Crop Science*. 2014. Vol. 54(2). P. 626–636. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.04.0239>.
21. *Методика проведення польових дослідів з біоенергетичними культурами* / за ред. М. В. Роїка, В. М. Сінченка. Київ : ІБКіЦБ, 2015. 112 с.

22. ДСТУ ISO 1026:2013. *Продукти харчові. Визначення вмісту сухої речовини методом висушування до постійної маси*. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 10 с.
23. ISO 6496:2005. *Animal feeding stuffs. Determination of moisture and other volatile matter content*. Geneva : ISO, 2005.
24. ДСТУ ISO 11465-2001. *Якість ґрунту. Визначення вмісту сухої речовини та вологості*. Київ : Держстандарт України, 2002.
25. ДСТУ EN ISO 18122:2015. *Біопалива тверді. Визначення вмісту золи*. Київ : Держспоживстандарт України, 2016. 12 с.
26. ДСТУ EN ISO 18125:2017. *Біопалива тверді. Визначення теплоти згоряння*. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 28 с.
27. McKendry P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*. 2002. Vol. 83. P. 37–46.
28. Ермантраут Е. Р. *Статистичний аналіз агрономічних дослідних даних в пакеті Statistica*. Київ, 2014. 150 с.

References:

1. Moroz, O. V., Smirnykh, V. M., Kurylo, V. L., Herasymenko, Yu. P., Mostovna, N. A., Horobets, A. M., Kulyk, M. I. (2011). Switchgrass as a new phytoenergy crop. *Sugar beets*, 3, 12–14. [in Ukrainian].
2. Roik, M. V., Kurylo, V. L., Hanzhenko, O. M., Humentyk, M. Ya. (2012). Prospects for bioenergy development in Ukraine. *Sugar beets*, 2–3, 6–8 [in Ukrainian].
3. Doronin, V. A., Kravchenko, Yu. A., Busol, M. V., Doronin, V. V. (2013). Quality of switchgrass seeds depending on sorting methods. *Scientific Papers of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet*, 19, 28–32. [in Ukrainian].
4. Kulyk, M. I. (2016). Yield dynamics and energy potential of switchgrass phytomass under a long-term cultivation cycle. *Bulletin of Poltava State Agrarian Academy*, 2, 115–119. [in Ukrainian].
5. Polishchuk, M. I., Kovbasiuk, B. M. (2016). Influence of sowing dates and row spacing on switchgrass biomass productivity. *Agriculture and Forestry*, 3, 266–273. [in Ukrainian].
6. Kulyk, M. I., Rozhko, I. I. (2017). Influence of weather conditions during the vegetation period on productivity elements and yield of switchgrass. *Bulletin of Poltava State Agrarian Academy*, 4, 50–55. [in Ukrainian].
7. Kaletnik, H. M., Mazur, V. A., Branitskyi, Yu. Yu., Mazur, O. V. (2020). *Optimization of technological methods for switchgrass cultivation under conditions of the Right-Bank Forest-Steppe: monograph*. Vinnytsia: VNAU [in Ukrainian].
8. Volvach, O. V., Zhyhailo, O. L., Kolosovska, V. V., Yarmolinskyi, O. Yu. (2022). Agroclimatic assessment of prospects for switchgrass (*Panicum virgatum*) cultivation in Forest-Steppe regions under climate change conditions. *Ecological Sciences*, 3, 123–130. [in Ukrainian].
9. Doronin, V. A., Kravchenko, Yu. A., Busol, M. V., Doronin, V. V. (2013). Quality of switchgrass seeds depending on sorting methods. *Scientific Papers of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet*, 19, 28–32. [in Ukrainian].
10. Polishchuk, M. I., Kovbasiuk, B. M. (2017). Influence of sowing dates on switchgrass biomass productivity. *Agriculture and Forestry*, 5, 70–77. [in Ukrainian].

11. Humentyk, M. (2020). Improvement of elements of switchgrass cultivation technology. *Bulletin of Agricultural Science*, 98(9), 15–20. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202009-02>. [in Ukrainian].
12. Sitnyk, A. A., Karbivska, U. M. (2025). Peculiarities of switchgrass productivity formation under climate change conditions in the Western region. *Ukrainian Journal of Natural Sciences*, 13, 310–317. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.13.2025.29>. [in Ukrainian].
13. Prysiashniuk, O. I., Musich, V. V., Kostyna, T. P., Kononiuk, N. O., Cherniak, M. O., Honcharuk, O. M., Kachura, Ye. V. (2023). Formation of yield and quality of switchgrass under long-term cultivation on low-productive soils of the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine. *Scientific Papers of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet*, 31, 110–125. <https://doi.org/10.47414/np.31.2023.292403> [in Ukrainian].
14. Dryha, V. V. (2024). Seed productivity of switchgrass depending on maturity groups of varieties. *Bioenergy*, 1, 19–21. <https://doi.org/10.47414/be.2024.No1.pp19-21>. [in Ukrainian].
15. Dryha, V. V. (2022). Influence of varietal characteristics and growing conditions of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) on pollen quality. *Collection of Scientific Papers of Uman National University of Horticulture*, 100(1), 75–82. <https://doi.org/10.31395/2415-8240-2022-100-1-75-82>. [in Ukrainian].
16. Hartman, J. C., Nippert, J. B., Orozco, R. A., Springer, C. J. (2011). Potential ecological impacts of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) biofuel cultivation in the Central Great Plains, USA. *Biomass and Bioenergy*, 35(8), 3415–3421.
17. Di Virgilio, N., Monti, A., Venturi, G. (2007). Spatial variability of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) yield as related to soil parameters in a small field. *Field Crops Research*, 101(2), 232–239. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.11.009>
18. Vogel, K. P., Mitchell, R. B. (2008). Heterosis in switchgrass: biomass yield in swards. *Crop Science*, 48(6), 2159–2164. <https://doi.org/10.2135/cropsci2008.02.0117>
19. Casler, M. D., Sosa, S., Hoffman, L., Mayton, H., Ernst, C., Adler, P. R., Bonos, S. A. (2017). Biomass yield of switchgrass cultivars under high-versus low-input conditions. *Crop Science*, 57(2), 821–832. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.08.0698>
20. Casler, M. D., Vogel, K. P. (2014). Selection for biomass yield in upland, lowland, and hybrid switchgrass. *Crop Science*, 54(2), 626–636. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.04.0239>
21. Roik, M. V., Sinchenko, V. M. (Eds.). (2015). *Methodology for conducting field experiments with bioenergy crops*. Kyiv: Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet. [in Ukrainian].
22. DSTU ISO 1026:2013. (2014). *Food products. Determination of dry matter content by drying to constant mass*. Kyiv: Ministry of Economic Development of Ukraine. [in Ukrainian].
23. ISO 6496:2005. (2005). *Animal feeding stuffs. Determination of moisture and other volatile matter content*. Geneva: ISO.
24. DSTU ISO 11465-2001. (2002). *Soil quality. Determination of dry matter and moisture content*. Kyiv: State Standard of Ukraine. [in Ukrainian].
25. DSTU EN ISO 18122:2015. (2016). *Solid biofuels. Determination of ash content*. Kyiv: Derzhspozhyvstandart of Ukraine. [in Ukrainian].
26. DSTU EN ISO 18125:2017. (2017). *Solid biofuels. Determination of calorific value*. Kyiv: UkrNDNC. [in Ukrainian].

27. McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83, 37–46.
28. Ermantraut, E. R. (2014). *Statistical analysis of agronomic experimental data in the Statistica package*. Kyiv. [in Ukrainian].

Annotation

Mandrovska S. M., Daniuk M. S., Ilchenko Ya. V., Kurochka N. V.
Formation of bioenergetic potential of *Panicum virgatum* L. varieties depending on the duration of agrophytocenosis functioning and harvesting times

Aim. To substantiate the patterns of productivity and bioenergetic potential formation in switchgrass (*Panicum virgatum* L.) varieties of domestic and foreign breeding, depending on the duration of plantation exploitation and biomass harvesting schedules, in order to optimize the raw material base for bioenergy.

Methods. Experimental studies were conducted during the period from the 2nd to the 17th year of the crop's vegetation at the research field network of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet of the NAAS of Ukraine. The experiments were integrated into a system of long-term bioenergy crop stands, which ensured high data representativeness and allowed for the study of the age dynamics of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) productivity over time. Factor A (Variety): Varieties of various ecological and geographical origins were studied: domestic (Morozko, Liadovskyi) and foreign (Cave-in-Rock, Forestburg). Factor B (Plantation Age): Monitoring was carried out in the 2nd, 5th, 8th, 10th, 15th, and 17th years of plantation use. Factor C (Harvesting Time): 1) Autumn (end of vegetation, October–November); 2) Spring (after overwintering, March–April).

Results. As a result of 17-year studies, it was established that the bioenergetic potential of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) depends on varietal characteristics, plantation age, and harvesting schedules. It was found that crop yield increases intensively until the 8th year of vegetation, followed by a stabilization period with a gradual decline in productivity after 15 years of use. Domestic varieties (Morozko, Liadovskyi) proved to be more adapted, providing a dry matter yield of 13,9–14,5 t/ha, which is 8–12% higher than the performance of foreign varieties (Cave-in-Rock, Forestburg). It has been proven that shifting the harvest time from autumn to spring ensures higher quality raw materials: dry matter content increases to 79,4–87,1%, while ash content decreases by 35–45% due to the leaching of mineral compounds by precipitation. The minimum ash content (2,5–2,7%) during spring harvesting is characteristic of domestic breeding, which is a significant advantage for fuel production. The maximum energy yield was recorded for the Morozko variety during spring harvesting – 268.3 GJ/ha. Analysis of variance results confirm the significance of all factors (LSD_{05} for variety = 7.8 GJ/ha). It is proven that domestic varieties maintain high productivity (over 170 GJ/ha) even in the 15th–17th years of vegetation, confirming the feasibility of long-term exploitation of switchgrass energy plantations.

Conclusions. The results of multifactorial analysis of variance confirm the significance of the interaction between factors A, B, and C (LSD_{05} for the ABC interaction regarding energy yield is 15.2 GJ/ha). This allows for the recommendation of the Morozko variety for establishing long-term energy plantations with an exploitation cycle of up to 17 years and a spring harvesting schedule as the most economically and technologically justified model.

Key words: switchgrass, yield, bioenergy, ash content, Morozko.