УДК 582.542.11:633.179]:[581.522.4+581.95] (477)

Д.Б. РАХМЕТОВ, О.М. ВЕРГУН, С.О. РАХМЕТОВА

Національний ботанічний сад ім. М.М. Гришка НАН України
Україна, 01014 м. Київ, вул. Тімірязєвська, 1

PANICUM VIRGATUM L. — ПЕРСПЕКТИВНИЙ ІНТРОДУЦЕНТ У НАЦІОНАЛЬНОМУ БОТАНІЧНОМУ САДУ ім. М.М. ГРИШКА НАН УКРАЇНИ

Представлено результати багаторічних інтродукційних досліджень Panicum virgatum L. (Poaceae) у Національному ботанічному саду ім. М.М. Гришка НАН України. Встановлено біолого-морфологічні особливості, біохімічний склад рослин, урожайність надземної маси і насіння. Визначено вихід найцінніших речовин та енергетичну цінність культури. Створено високопродуктивні форми із заданими параметрами урожайності, цукристості фітомаси, виходом загальної енергії та фітопалива з одиниці площі. Доведено, що в умовах інтродукції майже всі форми Panicum virgatum проходять повний цикл розвитку (від насіння до насіння) протягом одного вегетаційного періоду, починаючи з першого року життя. Фаза достигання насіння у ранньостиглих форм рослин настає до III декади вересня, у пізньостиглих — у середині жовтня, а окремі форми рослин вегетують до настання морозів. Основні морфометричні параметри рослин залежать від форми і сорту, групи стиглості. Урожайність надземної маси та загальна продуктивність рослин до фази цвітіння збільшуються, а до кінця вегетаційного періоду — знижуються. Пізньостиглі форми за урожайністю надземної маси значно переважають (на 58,0–155,6 %) ранньостиглі. Встановлено, що вміст сухої речовини в усіх форм рослин у період від фази кущення до фази достигання насіння збільшується, а цукрів, аскорбінової кислоти, каротину та ліпідів — зменшується. Щодо накопичення лігніну і клітковини в рослинах у період вегетації та теплоємності надземної маси чіткої залежності не виявлено. Як високопродуктивна культура Panicum virgatum забезпечує великий вихід сухої речовини, етанолу та енергії з надземної маси у різні періоди розвитку. Серед досліджених зразків рослин максимальною продуктивністю характеризувався сорт Зоряне.

Ключові слова: *Panicum virgatum, інтродукція, біоморфологія, біохімічні особливості, продуктивність, біопаливо.*

Вважається, що саме етанол має найбільший потенціал для виробництва біопалива, враховуючи невичерпні джерела його отримання (трав'янисті рослини і деревина, відходи сільського господарства та деревообробної промисловості, побутове сміття).

Україна належить до країн, які лише частково забезпечують себе традиційними видами енергоресурсів і змушена імпортувати близько 65 % викопних енергоносіїв, з них більшість припадає на природній газ та нафтопродукти, частка яких у структурі загальних обсягів імпорту становить близько 16 та 7 % відповідно. Сучасна енергетична політика України значною мірою ґрунтується на імпорті сировини, ціна на яку постійно зростає, тому освоєння нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії (НВДЕ) слід розглядати як важливий фактор підвищення рівня енергетичної безпеки та зниження негативного впливу енергетики на довкілля. Незважаючи на свою залежність від імпорту енергоресурсів, Україна мало приділяє уваги розвитку ВДЕ, частка яких у структурі енергоспоживання становить близько 1,8 %, що значно менше порівняно з європейськими країнами. Теоретично протягом 5–6 років можна збільшити частку альтернативної енергії до 10–15 %. Різні форми енергії біомаси можна використовувати для виробництва електроенергії, а також як паливо для транспорту (Система використання біоресурсів .., 2014). Наша країна має широкі можливості для промислового виробництва паливного етанолу, оскільки виробляє багато продуктів рослинництва. Щорічно нагромаджується велика кількість сільськогосподарських відходів.

© Д.Б. РАХМЕТОВ, О.М. ВЕРГУН, С.О. РАХМЕТОВА, 2014

Пріоритетними напрямами фітоенергетики є пошук дешевої біосировини, створення необхідної інфраструктури для вирощування енергетичних рослин та переробки біомаси за допомогою хімічних чи біологічних процесів у різні види біопалива: рідкі (етанол, метанол, бутанол, біодизель), газоподібні (метан, синтез газ, водень) і тверді (паливні гранули, брикети, щіпа, солома, лузга, дрова). Через значну продуктивність та високу якість сировини провідне місце серед енергетичних рослин посідають цукроносні культури (цукрові та кормові буряки, цукрове сорго, цикорій тощо), які є цінним джерелом сировини для виробництва біоетанолу (Возобновляемые растительные ресурсы, 2006). Світові обсяги виробництва біоетанолу за останнє десятиріччя зросли більш ніж утричі. Біоетанол застосовують переважно у вигляді паливних сумішей для підвищення октанового числа. Додавання до бензину 10 % біоетанолу дає змогу зменшити викиди аерозольних частинок на 50 %, викиди оксиду вуглецю (CO) — на 30 % (Перспективи розвитку біоенергетики в Україні, 2012).

Велику кількість рослин досліджено для визначення потенційної можливості використання їх як енергетичної культури, але лише невелику кількість видів вирощують на великих площах. З них найбільш поширеними є види родів *Miscanthus, Salix, Populus* та *Panicum virgatum* L. Ці культури вирощують від 10 до 30 років. Підготовка ґрунту для їх вирощування не потребує великих енергетичних витрат. Урожай збирають взимку або навесні з використанням звичайної сільськогосподарської техніки. До перспективних енергетичних рослин можна також віднести цукровий та кормовий буряк і сорго цукрове (Железная, 2008).

Серед нових перспективних енергетичних рослин на особливу увагу заслуговує *Panicum virgatum* — просо прутоподібне, яке в природній флорі трапляється на півдні Канади, в США і Мексиці на широті 55°. *Panicum virgatum* є одним з домінуючих видів центральних північно-американських прерій. Високу продуктивність плантація цього виду зберігає понад 10 років. На відміну від кукурудзи просо може зростати на бідних на поживні речовини ґрунтах (Vogel, 2004).

Panicum virgatum є високопродуктивною біоенергетичною культурою з великим потенціалом вирощування у різних ґрунтово-кліматичних умовах. Вона є цінним джерелом цукрів, які використовують для виробництва біоетанолу (Ma, 2001; McLaughlin, 2005; Lee, 2007; Monti, 2012).

У різних країнах проводять дослідження з підвищення продуктивності та енергетичної ефективності вирощування і використання сировини *Panicum virgatum* на біопаливо. Шляхом сучасних біотехнологічних методів створено генетично модифіковані рослини. Значно поліпшилася якість сировини для виробництва біопалива, що дало змогу збільшити вихід етанолу у 2,6 разу (Shen, 2013).

Panicum virgatum — теплолюбна багаторічна рослина. Розмножується як насінням, так і вегетативно. Основними способами використання проса прутоподібного в США і Канаді є виробництво електроенергії шляхом газифікації, комбіноване спалювання на вугільних заводах і виробництво етанолу для пального. *Panicum virgatum* вирощують на різних ґрунтах, він не вимогливий до вмісту вологи та поживних речовин у ґрунті і позитивно впливає на навколишнє середовище. Перевагами *Panicum virgatum* є стійкість до шкідників та хвороб, запобігання ерозії ґрунту. При його вирощуванні ерозія і рівень використання пестицидів зменшуються відповідно на 95 і 90 % (McLaughlin, 2002; Monti, 2012).

Просо прутоподібне можна вирощувати на землях, непридатних для культивування інших сільськогосподарських рослин. Вид відзначається низькою собівартістю технології вирощування, потребує незначних вкладень, забезпечуючи високі врожаї біомаси навіть на непродуктивних землях (Vogel, 2002; Monti, 2012).

Panicum virgatum має цінний хімічний склад надземної маси для біопалива — близько 50 % вуглецю, 43 % кисню і 6 % водню. В рослинах міститься 4–6 % золи, що пояснюється високою часткою листкової маси. Порівняно низький вміст калію і натрію у поєднанні з підви-

щеним вмістом кальцію та магнію в біомасі зумовлює високу температуру згоряння, що зменшує ймовірність ошлакування при спалюванні в котлах (Железная, 2008).

Висота рослин *Panicum virgatum* залежно від сорту та ґрунтово-кліматичних умов становить від 50 до 250 см. Рослини ефективно використовують азот і вологу, тобто є потенційно високопродуктивними культурами. Урожайність за вегетаційний період становить від 10 т/га сухої маси на північноєвропейських ґрунтах з низькою родючістю до 25 т/га на південноєвропейських ґрунтах з високою родючістю. З площі 1 га можна отримати від 5 до 12 т умовного палива (Monti, 2012).

Panicum virgatum можна також використовувати як ґрунтопокривну рослину для збереження ґрунтів і боротьби з ерозією, як кормову, технічну культуру і для мульчування. Сировина з проса прутоподібного може бути високоякісним субстратом для вирощування грибів (McLaughlin, 1998; Liebig, 2008; Mitchell, 2008; Monti, 2012).

Дослідження *Panicum virgatum* як біоенергетичної культури розпочалися у середині 1980-х років. Представники роду *Panicum*, будучи багаторічними травами, забезпечують середній та високий урожай на маргінальних сільськогосподарських угіддях. Нині розглядають можливість різнопланового використання проса в біоенергетиці, зокрема для виробництва целюлозного етанолу, біогазу, а також для спалювання з метою отримання теплової енергії. Основними перевагами *Panicum virgatum* як біоенергетичної культури є довголіття, посухостійкість та стійкість до затоплення (Schmer, 2008). Рослини проса стійкі до бур'янів, маловибагливі до ґрунтів та добрив, мають широку амплітуду адаптації та культивуються в помірному кліматі. У деяких південних теплих і вологих зонах, наприклад, у штаті Алабама (США), просо може забезпечувати до 25 т/га абсолютно сухої маси. Результати досліджень проса у 13 науково-дослідних установах США свідчать про можливість отримання від 9,4 до 22,9 т/га абсолютно сухої маси при середній урожайності 14,6 т/га (McLaughlin, 2005). Ці показники отримано на відносно малих площах, на великих слід очікувати принаймні на 20 % нижчі результати.

Panicum virgatum належить до рослин із C_4-схемою фотосинтезу, тобто має ефективну систему використання сонячної енергії. Доведено, що для виробництва 1 т сировини проса необхідно від 0,97 до 1,34 ГДж порівняно з 1,99–2,66 ГДж для виробництва 1 т зернових культур (Parrish, 2008; Monti, 2012). В інших дослідженнях показано, що просо використовує значно менше енергії (0,8 ГДж) на 1 т абсолютно сухої маси порівняно із зерном кукурудзи (2,9 ГДж) (Samson, 2005).

Просо містить близько 18,8 ГДж енергії на 1 т абсолютно сухої маси, що порівняно з витраченою на її виробництво енергією становить 20:1 (Samson, 2008). Ці дані свідчать про надзвичайно ефективне співвідношення між виходом енергії з урожаєм з 1 га та енерговитратами на її виробництво.

За результатами роботи фермерів (США) також доведено, що культура *Panicum virgatum* може забезпечити у 5 разів більший вихід енергії з одиниці площі, ніж потрібно для її вирощування. Залежно від умов вирощування, особливо від вологозабезпечення та кількості поживних речовин, *Panicum virgatum* може давати від 5,2 до 11,1 т/га повітряно-сухої маси. Рослина особливо чутлива до вологи у весняний період та в середині літа. З урахуванням витрат на вирощування просо прутоподібне забезпечує приріст виходу етанолу 54,0 %, що майже не поступається виходу етанолу з урожаєм кукурудзи (McLaughlin, 2005; Schmer, 2008).

В Україні актуальним є пошук найперспективніших рослинних джерел для виробництва біопалива другого покоління. Серед перспективних енергетичних культур є представники родини *Poaceae — Miscanthus, Sorghum saccharatum* (L.) Moench, *Panicum virgatum* тощо, які вирізняються комплексним використанням біомаси. Вони здатні дати 5–8 тис. л/га паливного етанолу чи бутанолу, 15–25 т/га брикетів, 10–20 тис. $м^3$ біогазу.

Незважаючи на перспективи використання *Panicum virgatum*, в Україні не проведено комп-

лексні дослідження з вивчення видового і формового різноманіття цієї культури, інтродукції, селекції та особливостей культивування залежно від еколого-географічних особливостей, не визначено вимоги рослин до умов навколишнього середовища, урожайний, продуктивний та енергетичний потенціал в умовах культури, не створено високоадаптивні сорти, не розроблено високоефективні технології виробництва і переробки сировини.

Важливе значення має створення генофонду нової цукроносної культури — *Panicum virgatum* і відбір високопродуктивних форм.

Предметом дослідження були форми та сорти *Panicum virgatum*, створені у відділі нових культур Національного ботанічного саду ім. М.М. Гришка НАН України.

Польові досліди тривалістю від трьох до шести років закладали відповідно до методик Держсортомережі у 4-разовій повторюваності. Вивчення фенологічних фаз проводили за методикою І.М. Бейдеман. Біометричні вимірювання виконано за методиками Г.М. Зайцева та Б.А. Доспєхова. Для визначення однорідності насіння і маси 1000 шт. насінин застосовано методичні вказівки з насінництва інтродуцентів та міжнародні правила визначення якості насіння.

Хімічні аналізи рослин проводили в біохімічній лабораторії відділу нових культур НБС ім. М.М. Гришка за відповідними методиками. Для виявлення біохімічної цінності надземної маси та насіння визначали: абсолютно суху речовину — шляхом висушування зразків за температури 105 °С до постійної маси; вміст ліпідів — методом визначення знежиреного залишку за допомогою апарата Сокслета; вміст золи — методом спалювання зразків у муфельній печі (за температури 500...700 °С); вміст каротину — за Судіною, аскорбінової кислоти — за Ярусовою, сирої клітковини — за Геннебергом і Штоманом, вуглеводів — за А.В. Петербурзьким. Визначення кількості енергії в зразках рослин здійснювали на калориметрі ИСО-200. Фотографії виконано авторами цифровою фотокамерою Canon 400Д.

Математичну обробку результатів проводили методом дисперсійного аналізу та статистичної оцінки середніх відповідно до методики Б.А. Доспєхова і за допомогою програми Excel.

У відділі нових культур НБС ім. М.М. Гришка протягом багатьох років проводиться відбір найперспективніших форм *Panicum virgatum* як джерела паливного біоетанолу, визначення біологічних, екологічних та біохімічних особливостей, урожайності насіння і біомаси, виходу біоетанолу та побічної продукції, створення високопродуктивних сортозразків. Зібрано генофонд *Panicum virgatum* — 12 зразків, які характеризуються скоростиглістю, посухостійкістю, високою урожайністю фітомаси та насіння.

В умовах інтродукції рослини *Panicum virgatum* за роки дослідження характеризувалися високими ростовими параметрами, урожаєм та цінним хімічним складом. Основні морфометричні параметри рослин проса прутоподібного залежали від умов вегетації, періоду розвитку та формових особливостей. В нових умовах майже всі форми *Panicum virgatum* проходять повний цикл розвитку (від насіння до насіння) протягом одного вегетаційного періоду.

Залежно від формових та сортових особливостей рослини ранніх форм завершують інтенсивну вегетацію у III декаді серпня, середніх форм — до кінця вересня, пізніх форм — до кінця жовтня. В окремі роки рослини пізніх і дуже пізніх форм лишаються зеленими до сильних приморозків (–5...7 °С). Для рослин різних форм та сортів *Panicum virgatum* характерне різнокольорове осіннє забарвлення надземної маси, що робить їх надзвичайно декоративними рослинами.

Після завершення вегетаційного періоду надземна маса рослин відмирає. Рослини *Panicum virgatum* — досить зимостійкі. Після перезимівлі рано навесні (І декада квітня) починається інтенсивне відростання рослин. У II декаді квітня рослини досягають 7–10 см висоти. На початку червня рослини розвиваються до фази кущіння і формують травостій заввишки 40–50 см. До І декади липня рослини досягають фази виходу у трубку (рис. 1, *А*). Їх висота — 90–120 см. Інтенсивний ріст рослин триває до І декади серпня, коли вони розвиваються до

фази цвітіння і досягають висоти 140–160 см, окремі форми — до 210–220 см (рис.1, *В*). До початку достигання насіння ростові процеси уповільнюються. Фаза достигання насіння у різних форм настає у різні строки.

У перший рік життя рослини проса прутоподібного характеризуються інтенсивним пагоноутворенням. Кількість основних продуктивних стебел на рослині у період генеративного розвитку залежно від форми та умов вегетації становить від 3–4 до 20 шт. На другий та у наступні роки життя кількість продуктивних пагонів на рослині суттєво збільшується — від 12–14 до 30–35 шт.

Результати досліджень свідчать про те, що форми *Panicum virgatum* суттєво відрізняються за темпами росту і розвитку рослин, габітусом, забарвленням різних органів, формою суцвіття тощо.

За габітусом рослини залежно від форми бувають прямі, напіврозлогі та розлогі. Кількість метамерів на стеблі становить від 3 до 7, а в окремих форм — до 9.

Діаметр біля основи стебла в середньому становить 4–6 мм, але трапляються форми з тонкішими і товстішими стеблами.

Кількість бічних пагонів на стеблі різних форм проса прутоподібного становить 2–4. Більшість форм рослин мають генеративні пагони без розгалуження. Листкова пластинка завдовжки 50–60 см, у деяких форм може бути значно довшою; завширшки в середньому 11–14 мм.

За формою волоть проса прутоподібного буває розлогою, комовою, овальною, пірамідальною, стиснутою (рис. 2)

Довжина волоті форм *Panicum virgatum* становить 30–40 см, ширина — 20–30 см. За щільністю волоті бувають нещільні, середньої щільності та щільні.

Забарвлення зернівки — жовто-коричневе, коричневе, темно-коричневе.

За масою 1000 шт. виділяють три групи зернівок: з малою масою — до 1,5 г, із середньою масою — 1,5–1,8 та з великою масою — понад 1,8 г.

Кореневище рослини *Panicum virgatum* складається з 8–25 ризом залежно від року життя

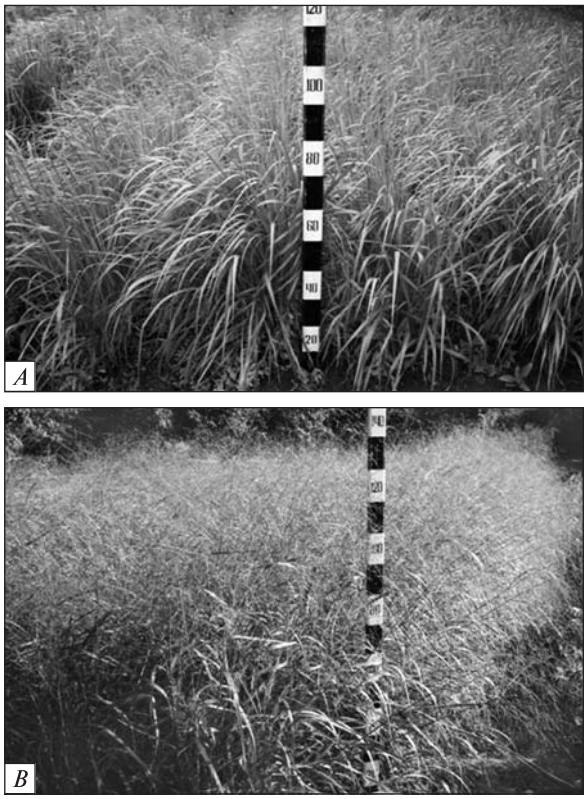

Рис. 1. *Panicum virgatum*: *А* — фаза виходу в трубку (І декада липня); *В* — фаза цвітіння (І декада серпня)

Figure 1. *Panicum virgatum*: *A* — stem extension phase (first decade of July); *B* — heading phase (first decade of August)

та форми. Кількість ризом може суттєво змінюватися під впливом багатьох факторів. Ризоми в середньому мають довжину 5–7 см.

Ранньостиглі форми (ВР, РБ, ДН) у період цвітіння значно поступаються пізньостиглим за основними морфометричними параметрами (табл. 1). Стебла ранньостиглих форм рослин тонкіші, тому більшість з них за габітусом розлогі. Листкова пластинка у них за довжиною та шириною менша порівняно з такою у пізньостиглих. В останніх габітус рослин прямий.

У ранньостиглих форм волоть коротша і вужча, у пізньостиглих — ширша і довша (табл. 2). У період достигання насіння у рослин *Panicum virgatum* змінюються основні морфометричні параметри порівняно з попередньою фазою. Особливо це стосується пізньостиглих форм,

Рис. 2. Формове різноманіття волоті рослин *Panicum virgatum* (*1, 3, 4* — пізньостиглі форми, *2, 5* — ранньостиглі форми)

Figure 2. Diversity of panicle branching pattern in Panicum virgatum (*1, 3, 4* — retard ripening forms, *2, 5* — early ripening forms)

у яких висота рослин досягає 184,0–210,0 см. Кількість міжвузлів та листків на рослинах різних форм суттєво не відрізняється. Рослини ранньостиглих форм у цей період починають усихати, діаметр стебла зменшується до 2,1–2,4 мм.

Зернівка *Panicum virgatum* — дрібна. Залежно від форми маса 1000 шт. становить від 1,57 до 1,90 г. У ранньостиглих форм маса 1000 шт. є меншою, в середньому — 1,67 г, у пізньостиглих — 1,81 г. Довжина зернівки різних форм *Panicum virgatum* суттєво не відрізняється і становить від 2,9 до 3,2 мм, а ширина — від 1,38 до 1,53 мм.

Одним з основних показників продуктивності є урожайність насіння. Рослина *Panicum virgatum* формує в середньому 8–9 г зернівок (табл. 3): ранньостиглі форми — від 7,2 до 9,5 г, пізньостиглі — від 9,7 до 11,2 г на рослину. Урожайність зернівок з одиниці площі становить: у ранньостиглих форм — 108,0–142,5 г/м^2, у пізньостиглих — 123,0–168,0 г/м^2.

Усі досліджувані зразки характеризувалися високою продуктивністю надземної маси. Цей показник залежав від багатьох факторів — погодно-кліматичних умов року, формових та сортових особливостей рослин, періоду вегетації, технології вирощування, удобрення тощо.

Таблиця 1. **Морфометричні параметри рослин *Panicum virgatum* залежно від форми та фази розвитку**

Table 1. **Morphometric parameters of *Panicum virgatum* plant in relation to form and phase of development**

Форма (сорт)	Фаза розвитку	Висота рослини, см	Діаметр стебла, мм	Кількість міжвузлів, шт.	Довжина листків, см	Ширина листків, см
ВР	Кінець цвітіння	146,3 ± 3,99	2,93 ± 0,11	5,3 ± 0,16	45,8 ± 1,49	1,28 ± 0,06
РБ	"	131,2 ± 2,12	2,75 ± 0,14	5,8 ± 0,26	52,1 ± 1,26	1,32 ± 0,03
ДН	"	141,5 ± 1,56	2,45 ± 0,17	5,2 ± 0,09	58,6 ± 1,09	1,29 ± 0,04
ВП	Початок цвітіння	163,7 ± 2,34	3,65 ± 0,11	6,5 ± 0,19	60,3 ± 1,04	1,41 ± 0,05
ДВ	"	183,2 ± 1,78	4,15 ± 0,14	7,1 ± 0,66	71,8 ± 1,45	1,45 ± 0,02
Зоряне	"	179,5 ± 2,12	4,65 ± 0,18	7,6 ± 0,29	65,1 ± 1,32	1,49 ± 0,03

Серед досліджуваних форм рослин *Panicum virgatum* у період викидання волоті найбільшою продуктивністю надземної маси характеризувалися пізньостигла форма ВП і сорт Зоряне (табл. 4). У структурі надземної маси у цей період більша частка припадає на листки.

Урожайність надземної маси рослин *Panicum virgatum* у період викидання волоті у ранньостиглих форм становить 41,35–41,81 т/га, у пізньостиглих — 46,10–64,16 т/га. По закінченні фази розвитку відбувається збільшення ростових та продуктивних показників рослин. Порівняно з попереднім періодом у фазі цвітіння у рослин ранньостиглих форм продуктивність збільшується на 4,5–10,8 %, у пізньостиглих — на 8,1–20,0 %. Як і в попередній фазі найбільшою продуктивністю характеризувався сорт Зоряне. У структурі надземної маси 38,3–39,9 % припадало на частку стебел, 39,0–44,8 % — на частку листків та 16,7–21,5 % — на частку суцвіть.

У фазі цвітіння встановлено збільшення урожайності надземної маси *Panicum virgatum* порівняно з попереднім періодом (на 2,2–9,4 %). Рослини залежно від форми та сорту забезпечували урожайність надземної маси від 42,73 до 70,19 т/га (табл. 5). Серед досліджуваних зразків пізньостиглі форми значно (на 14,2–39,1 %) переважали ранньостиглі.

До фази достигання насіння спостерігається значне зменшення продуктивності рослин. Порівняно з попереднім періодом цей показник у *Panicum virgatum* зменшується на 31,4–101,9 %.

Між зразками встановлено суттєву відмінність за масою 10 продуктивних стебел та рослини в цілому. Пізньостиглі форми за обома показниками переважали (на 58,4–133,1 % і 50,5–121,3 % відповідно) ранньостиглі.

Таблиця 2. **Морфометрична характеристика волоті рослин *Panicum virgatum***

Table 2. **Morphometric parameter of *Panicum virgatum* panicle**

Форма (сорт)	Довжина волоті, см	Ширина волоті, см
ВР	34,6 ± 1,45	24,3 ± 0,12
РБ	38,3 ± 1,17	26,2 ± 0,26
ДН	30,5 ± 1,40	24,7 ± 0,33
ВП	42,6 ± 1,46	31,4 ± 0,16
ДВ	50,2 ± 1,99	37,8 ± 0,34
Зоряне	41,2 ± 1,41	33,7 ± 0,17

Таблиця 3. **Продуктивність рослин та урожайність зернівок *Panicum virgatum***

Table 3. **Productivity and yield potential of *Panicum virgatum* seeds**

Форма (сорт)	Продуктивність зернівок, г/рослину	Урожайність зернівок, г/м^2
ВР	7,2	108,0
РБ	9,5	142,5
ДН	7,4	111,0
ВП	9,7	145,5
ДВ	8,2	123,0
Зоряне	11,2	168,0
НІР$_{05}$	0,3	5,5

Таблиця 4. **Продуктивність та структура надземної маси рослин *Panicum virgatum* (n =10)**

Table 4. **Productivity and structure of above ground mass of *Panicum virgatum* plant (n=10)**

Форма (сорт)	Фаза розвитку	Маса, г			Структура надземної маси, %	
		надземна	стебел	листків	стебел	листків
ВР	Викидання волоті	92,5	40,7	51,8	44,0	56,0
РБ	"	89,5	40,3	49,2	45,0	55,0
ВП	Початок викидання волоті	100,0	43,0	57,0	43,0	57,0
Зоряне	"	131,2	56,4	74,8	43,0	57,0
НІР$_{05}$			4,3			

Як і продуктивність окремої особини, так і урожайність надземної маси, значно знизилися до кінця вегетаційного періоду. Різниця з попереднім періодом за цим показником становила 21,6–49,6 %. Пізньостиглі форми за урожайністю надземної маси значно переважали (на 58,0–155,6 %) ранньостиглі.

Найбільше сухої речовини накопичувалось у рослин сорту Зоряне, найменше — у форми РБ. Загальний вміст цукрів становив від 4,52 до 9,48 % і був максимальним у сорту Зоряне. Рівень аскорбінової кислоти у досліджуваних рослин *Panicum virgatum* у період викидання волоті становив 50,85–74,85 мг%, каротину — 0,11–0,25 мг%. Вміст ліпідів варіював від 1,71 до 5,73 % і був максимальним у форми РБ.

Кількість лігніну у рослин *Panicum virgatum* у фазі викидання волоті становила від 6,27 до 10,00 %. Найбільшим вмістом лігніну характеризувався зразок ВР, а найменшим — РБ.

У форми РБ зафіксовано найбільший вміст клітковини — 50,85 %, у форми ВР — найменший.

Теплоємність різних форм *Panicum virgatum* протягом вегетації становила від 3962,0 до 4343,7 ккал/кг. Найвищою теплоємністю характеризувалися рослини форми ВР, найнижчою — форми РБ.

У період цвітіння у досліджуваних зразків проса прутоподібного значно збільшується вміст сухої речовини, а цукрів, аскорбінової кислоти, каротину та ліпідів — зменшується.

Дослідження надземної маси *Panicum virgatum* у фазу достигання насіння виявило, що найбільше сухої речовини накопичували рослини форми РБ, найменше — форми ВП (табл. 6). Загальний вміст цукрів у рослин різних форм у цей період становив від 4,36 до 7,32 %. Найбільше їх виявлено у сорту Зоряне.

Вміст аскорбінової кислоти у досліджуваних форм рослин *Panicum virgatum* був невисоким і становив від 23,28 до 59,84 мг%. Найбільше каротину виявлено у форми ВР, найменше — у форми ВП. Найбільшою кількістю ліпідів у надземній масі в період достигання насіння характеризувалася форма ВР, найменшою — сорт Зоряне. За вмістом лігніну переважали рослини пізньої форми, за вмістом клітковини — ранньої форми.

Теплоємність рослин *Panicum virgatum* у фазу достигання насіння становила від 4011,67 до

Таблиця 5. **Урожайність надземної маси *Panicum virgatum* у фазі цвітіння рослин**

Table 5. **Yield potential of above ground mass of *Panicum virgatum* during flowering phase**

Форма (сорт)	Урожайність, т/га			
	надземної маси	листків	стебел	суцвіть
ВР	42,73	17,48	17,05	8,20
РБ	48,07	18,75	18,98	10,34
ВП	56,04	24,66	22,02	9,36
Зоряне	70,19	31,45	26,88	11,86
$НІР_{05}$	2,3			

Таблиця 6. **Біохімічна характеристика рослин *Panicum virgatum* у фазі достигання насіння**

Table 6. **Biochemical properties of *Panicum virgatum* plant in the ripening of seeds phase**

Форма (сорт)	Суха речовина, %	Цукри, %	Аскорбінова кислота, мг%	Каротин, мг%	Ліпіди, %
ВР	40,70 ± 0,20	4,36 ± 0,35	35,38 ± 0,85	0,45 ± 0,02	3,57 ± 0,84
РБ	42,52 ± 0,02	4,70 ± 0,05	23,28 ± 1,22	0,43 ± 0,02	2,16 ± 0,09
ВП	36,06 ± 0,68	6,90 ± 0,07	59,84 ± 1,96	0,21 ± 0,01	1,38 ± 0,09
Зоряне	37,14 ± 0,14	7,32 ± 0,19	42,07 ± 1,22	0,42 ± 0,01	1,22 ± 0,07

4349,67 кал/г. Форми ВР, РБ та сорт Зоряне мали більші показники.

Як високопродуктивна культура *Panicum virgatum* забезпечує великий вихід сухої речовини, етанолу та енергії з надземної маси у різні періоди розвитку. Продуктивність рослин суттєво залежала від форми та сорту і фази розвитку. Великий вихід сухої речовини (11,28–15,48 т/га) та етанолу (2797–3669 л/га) у різних форм *Panicum virgatum* отримують на початку технічної стиглості (у фазі викидання волоті).

За виходом як сухої речовини, так і етанолу переважали пізньостиглі форми. В межах групи стиглості серед ранніх форм вищі показники були у форми ВР, серед пізніх — у сорту Зоряне. У цей період досліджувані зразки забезпечували великий вихід енергії з надземної маси (45,12–64,94 Гкал/га).

Закономірності щодо вищої енергетичної цінності окремих форм надземної маси порівняно з попередніми показниками зберігалися як у межах групи стиглості, так і між групами.

Продуктивність *Panicum virgatum* за виходом сухої речовини, етанолу та енергії з надземної маси у фазі цвітіння суттєво збільшувалася порівняно з фазою викидання волоті. Залежно від форми різниця між фазами за виходом сухої речовини становила від 29,6 до 41,7 %, за етанолом — від 28,1 до 39,3 %, за виходом енергії з надземної маси — від 35,7 до 40,9 % (табл. 7).

Серед досліджуваних зразків найбільший вихід сухої речовини (21,7–34,3 %), етанолу (16,2–29,8 %) та енергії (21,4–34,0 %) забезпечили пізньостигла група рослин (форма ВП та сорт Зоряне), а в межах цієї групи вищу продуктивність мали форма РБ та сорт Зоряне.

Із завершенням періоду активної вегетації рослин спостерігали значне зменшення основних показників продуктивності. В період достигання насіння порівняно з фазою цвітіння вихід сухої речовини зменшувався на 9,5–40,1 %, етанолу — на 11,5–41,3 %, енергії — на 6,3–37,7 %.

Пізні форми *Panicum virgatum* за продуктивністю значно переважали ранні. Різниця за виходом сухої речовини становила 75,1–78,5 %, етанолу — 68,5–71,9 %, енергії з надземної маси — 73,9–75,2 %. Серед досліджуваних зразків рослин максимальну продуктивність забезпечив сорт Зоряне, мінімальну — форма ВР.

Таким чином, у НБС ім. М.М. Гришка НАН України протягом багаторічного періоду проведено дослідження з вивчення біолого-морфологічних особливостей, біохімічного складу рослин, урожайності надземної маси, насіння, виходу найцінніших речовин та енергетичної цінності *Panicum virgatum*. Створено високопродуктивні форми із заданими параметрами урожайності, цукристості фітомаси, виходом загальної енергії та фітопалива з одиниці площі.

В умовах інтродукції майже всі форми рослин *Panicum virgatum* проходять повний цикл розвитку від насіння до насіння протягом одного вегетаційного періоду. Фаза достигання

Таблиця 7. **Продуктивність *Panicum virgatum* за виходом сухої речовини, етанолу та енергії з надземної маси у фазі цвітіння**

Table 7. **Productivity of *Panicum virgatum* plant correspondingly to dry mass, ethanol, and energy output of above-ground mass during flowering phase**

Форма (сорт)	Вихід сухої речовини, т/га	Вихід етанолу, л/га	Вихід енергії з надземної маси, Гкал/га
ВР	14,62	3582	61,21
РБ	16,33	3936	68,26
ВП	17,79	4163	74,29
Зоряне	21,93	5110	91,49
$НІР_{05}$		0,67	

насіння залежно від форми настає у різні строки. У ранньостиглих форм *Panicum virgatum* до III декади вересня насіння повністю достигає. Розвиток пізньостиглих форм завершується до середини жовтня, а окремі форми рослин вегетують до настання морозів. Основні морфометричні параметри рослин *Panicum virgatum* залежать від форми та сорту, групи стиглості.

Установлено, що вміст сухої речовини в усіх форм *Panicum virgatum* у період від фази кущіння до достигання насіння закономірно збільшується, цукрів, аскорбінової кислоти, каротину та ліпідів — зменшується. Щодо накопичення лігніну і клітковини в рослинах за період вегетації та теплоємності надземної маси залежності не виявлено.

Як високопродуктивна культура *Panicum virgatum* забезпечує великий вихід сухої речовини, етанолу та енергії з надземної маси у різні періоди розвитку рослин. Урожайність фітомаси рослин у період викидання волоті у ранньостиглих форм становить 41,35–41,81 т/га, у пізньостиглих — 46,10–64,16 т/га. В цілому продуктивність рослин за виходом сухої речовини, етанолу та енергії з надземної маси у фазі цвітіння суттєво збільшується порівняно з фазою викидання волоті. Із завершенням періоду активної вегетації рослин відбувається значне зменшення основних показників продуктивності. Пізні форми *Panicum virgatum* за продуктивністю значно переважають ранні. Серед досліджених зразків рослин максимальною продуктивністю характеризувався сорт Зоряне.

Возобновляемые растительные ресурсы / Д. Шпаар, Д. Драгер, С. Каленская, Д. Рахметов; под общ. ред. Д. Шпаар. — СПб.: Пушкин, 2006. — Т. 1. — 416 с.

Железная Т.А. Энергетические культуры как эффективный источник возобновляемой энергии / Т.А. Железная, А.В. Морозова // Пром. теплотехніка. — 2008. — Т. 30, № 3. — С. 60–76.

Перспективи розвитку біоенергетики в Україні / М.В. Роїк, В.Л. Курило, О.М. Ганженко, М.Я. Гументик // Цукрові буряки. — 2012. — № 2-3. — С. 6–8.

Рахметов Д.Б. Теоретичні та прикладні аспекти інтродукції рослин в Україні / Д.Б. Рахметов. — К.: Аграр Медіа Груп, 2011. — 398 с.

Система використання біоресурсів у новітніх біотехнологіях отримання альтернативних палив / Я.Б. Блюм, І.П. Григорюк, К.В. Дмитрук [та ін.] — К.: Аграр Медіа Груп, 2014. — 360 с.

*Developing e*nergy crops for thermal applications: optimizing fuel quality, energy security and GHG Mitigation. In: Biofuels, Solar and Wind as Renewable Energy Systems: Benefits and Risks / R. Samson, C. Ho Lem, S. Bailey-Stamler [et al.]. — Berlin, Germany: Springer Science, 2008. — P. 395–423.

Enhanced characteristics of genetically modified switchgrass (*Panicum virgatum* L.) for high biofuel production / H. Shen, C.R. Poovaiah, A. Ziebell [et al.] // Biotechnology for Biofuels. — 2013. — [http://www.biotechnologyforbiofuels.com/content/6/1/71]

Lee D.K. Switchgrass and soil carbon sequestration response to ammonium nitrate, manure, and harvest frequency on Conservation Reserve Program land / D.K. Lee, V.N. Owens, J.J. Doolittle // Agron. J. — 2007. — P. 462–468.

Liebig M.A. Soil carbon storage by switchgrass grown for bioenergy / M.A. Liebig, M.R. Schmer, K.P. Vogel [et al.] // BioEnergy Research. — 2008. — P. 215–222.

Ma Z. Impact of row spacing, nitrogen rate, and time on carbon portioning of switchgrass / Z. Ma, C.W. Wood, D.I. Bransby // Biomass and Bioenergy. — 2001. — P. 413–419.

McLaughlin S.B. High-value renewable energy from prairie grasses / S.B. McLaughlin., D.G. De La Torre Ugarte, C.T. Garten [et al.] // Environ. Sci. Technol. — 2002. — P. 2122–2129.

McLaughlin S.B. Development of switchgrass (*Panicum virgatum*) as a bioenergy feedstock in the United States / S.B. McLaughlin, L.A. Kszos // Biomass and Bioenergy. — 2005. — P. 515–535.

McLaughlin S.B. Evaluating the environmental consequences of producing herbaceous crops for bioenergy / S.B. McLaughlin, M.E. Walsh // Biomass and Bioenergy. — 1998. — P. 317–324.

Mitchell R.B. Managing and enhancing switchgrass as a bioenergy feedstock / R.B. Mitchell, K.P. Vogel, G. Sarath // Biofuels, Bioproducts, & Biorefining. — 2008. — P. 530–539.

Monti A. Switchgrass: A valuable biomass crops for energy / A. Monti. —Lodon: Springer-Verlag, 2012. — 290 p.

Net energy of cellulosic ethanol from switchgrass / M.R. Schmer, K.P. Vogel, R.B. Mitchell [et al.] // Proc. National Acad. Sci. — 2008. — P. 464–469.

Parrish D.J. Establishing and managing switchgrass as an energy crop / D.J. Parrish, J.H. Fike, D.I. Bransby [et al.] // Forage and Grazinglands. — 2008. — P. 68–82.

The potential of C_4 perennial grasses for developing a global BIOHEAT industry / R. Samson, C. Ho Lem, S. Bailey-Stamler [et al.] // Critical Reviews in Plant Science. — 2005. — Vol. 25. — P. 461–495.

Switchgrass biomass production in the Midwest USA: Harvest and nitrogen management / K.P. Vogel, J.J. Brejda, D.T. Walters [et al.] // Agron. J. — 2002. — P. 413–420.

Vogel K.P. Switchgrass. In: L.E. Moser et al., eds. Warm-season (C_4) Grasses / K.P. Vogel //ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI. — 2004. — P. 561–588

REFERENCES

Shpaar D., Drager D., Kalenskaya S., Rahmetov D. (2006) Vozobnovlyaemyie rastitelnyie resursyi [Renewable vegetation resources], Pushkin, t. 1, 416 p.

Zheleznaya T.A., Morozova A.V Energeticheskie kultury kak effektivnij istochnik vozobnovlyaemoj energii [Energy crops as an effective source of renewable energy// Prom. Teplotexnika, 2008, t. 30, N 3, p. 60–76.

Royik M.V., Kurilo V.L., Ganzhenko O.M., Gumentik M.Ya. (2012) Perspektivi rozvitku bioenergetiki v Ukrayini [Prospects of bioenergy development in Ukraine], Tsukrovi buryaki, N 2-3, p. 6–8.

Rakhmetov D.B. (2011) Teoretychni ta prykladni aspekty introduktsii roslyn v Ukraini [Theoretical and practical aspects of plant introduction in Ukraine], Kyiv, Agrar Media Grup, 398 p.

Blyum Ya.B., Grigoryuk I.P., Dmitruk K.V., Dubrovin V.O. Yemec A.I., Kaletnik G.M., Melnichuk M.D., Mironenko V.G., Rakhmetov D.B., Sibirnij A.A., Cigankov S.P. (2014) Sistema vykorystannya bioresursiv i novitnikh biotekhnologiya otrymannya alternatyvnykh palyv [System of bioresources usage and modern biotechnology in production of alternatives fuels], Kyiv, Agrar Media Grup, 360 p.

Samson R., Ho Lem C., Bailey-Stamler S. et al. (2008) Developing energy crops for thermal applications: optimizing fuel quality, energy security and GHG mitigation. In Biofuels, Solar and Wind as Renewable Energy Systems: Benefits and Risks / D. Pimental. (Ed.) Springer Science, Berlin, Germany, p. 395–423.

Shen H., Poovaiah C., Ziebell A. et al. (2013) Enhanced characteristics of genetically modified switchgrass (*Panicum virgatum* L.) for high biofuel production, Biotechnology for Biofuels, [http://www.biotechnologyforbiofuels.com/content/]

Lee D.K., Owens V.N., Doolittle J.J. (2007) Switchgrass and soil carbon sequestration response to ammonium nitrate, manure, and harvest frequency on Conservation Reserve Program land, Agron. J., p. 462–468.

Liebig M.A., Schmer M.R., Vogel K.P. et al. (2008) Soil carbon storage by switchgrass grown for bioenergy, BioEnergy Research, p. 215–222.

Ma Z., Wood C.W. and Bransby D.I. (2001) Impact of row spacing, nitrogen rate, and time on carbon portioning of switchgrass, Biomass and Bioenergy, p. 413–419.

McLaughlin S.B., De La Torre Ugarte D.G., Garten C.T. et al. (2002) High-value renewable energy from prairie grasses, Environ. Sci. Technol., p. 2122–2129.

McLaughlin S.B., Kszos L.A. (2005) Development of switchgrass (*Panicum virgatum*) as a bioenergy feedstock in the United States, Biomass and Bioenergy, p. 515–535.

McLaughlin S.B., Walsh M.E. (1998) Evaluating the environmental consequences of producing herbaceous crops for bioenergy, Biomass and Bioenergy, p. 317–324.

Mitchell R.B., Vogel K.P., Sarath G. (2008) Managing and enhancing switchgrass as a bioenergy feedstock, Biofuels, Bioproducts, & Biorefining, p. 530–539.

Monti A. Switchgrass: A valuable biomass crops for energy (2012) Springer-Verlad Lodon, 290 p.

Schmer M.R., Vogel K.P., Mitchell R.B. et al. (2008) Net energy of cellulosic ethanol from switchgrass, Proc. National Acad. Sci, p. 464–469.

Parrish D.J., Fike J.H., Bransby D.I. et al. (2008) Establishing and Managing Switchgrass as an Energy Crop, Forage and Grazinglands, p. 68–82.

Samson R., Ho Lem C., Bailey-Stamler S. et al. (2005) The Potential of C_4 Perennial Grasses for Developing a Global BIOHEAT Industry, Critical Reviews in Plant Science, Vol. 25, p. 461–495.

Vogel K., Brejda J., Walters D. et al. (2002) Switchgrass biomass production in the Midwest USA: Harvest and nitrogen management, Agron. J., p. 413–420.

Vogel K.P. (2004) Switchgrass. In: L.E. Moser et al., eds. Warm-season (C_4) Grasses, ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, p. 561–588.

Надійшла до редакції 30.04.2014 р.
Рекомендував до друку П.А. Мороз

Д.Б. Рахметов, Е.Н. Вергун, С.А. Рахметова

Национальный ботанический сад им. Н.Н. Гришко НАН Украины, Украина, г. Киев

PANICUM VIRGATUM L. — ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ИНТРОДУЦЕНТ В НАЦИОНАЛЬНОМ БОТАНИЧЕСКОМ САДУ им. Н.Н. ГРИШКО НАН УКРАИНЫ

Представлены результаты многолетних интродукционных исследований *Panicum virgatum* L. (*Poaceae*) в Национальном ботаническом саду им. Н.Н. Гришко НАН Украины. Установлены биолого-морфологические особенности, биохимический состав растений, урожайность надземной массы и семян. Определены выход ценных веществ и энергетическая ценность культуры. Созданы высокопродуктивные формы с заданными параметрами урожайности, сахаристости фитомассы, выходом общей энергии и фитотоплива с единицы площади. Показано, что в условиях интродукции почти все формы *Panicum virgatum* проходят полный цикл развития (от семени до семени) в течение одного вегетационного периода, начиная с первого года жизни. Фаза созревания семян у раннеспелых форм растений наступает к III декаде сентября, у позднеспелых — в середине октября, а отдельные формы растения вегетируют до наступления морозов. Основные морфометрические параметры растений

зависят от формы и сорта, группы спелости. Урожайность надземной массы и общая продуктивность растений в фазе цветения увеличивается, а к концу вегетационного периода — снижаются. Позднеспелые формы по урожайности надземной массы значительно превышают (на 58,0–155,6 %) раннеспелые. Установлено, что содержание сухого вещества у всех форм растений в период от фазы кущения до созревания семян увеличивается, а сахаров, аскорбиновой кислоты, каротина и липидов — уменьшается. Относительно накопления лигнина и клетчатки в растениях в период вегетации и теплоемкости надземной массы четкой зависимости не установлено. Как высокопродуктивная культура *Panicum virgatum* обеспечивает большой выход сухого вещества, этанола и энергии из надземной массы в разные периоды развития. Среди исследованных образцов растений максимальной продуктивностью характеризовался сорт Зоряне.

Ключевые слова: *Panicum virgatum*, интродукция, биоморфология, биохимические особенности, продуктивность, биотопливо.

D.B. Rakhmetov, O.M. Verhun, S.O. Rakhmetova

M.M. Gryshko National Botanical Garden,
National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine, Kyiv

PANICUM VIRGATUM L. — PROMISSING INTRODUCED CROP IN M.M. GRYSHKO NATIONAL BOTANICAL GARDEN OF THE NAS OF UKRAINE

Results of many years of introduction research on *Panicum virgatum* L. (*Poaceae*) in M.M. Gryshko National Botanical Garden of the NAS of Ukraine are presented. The biomorphological characteristics, biochemical composition of the plant, crop yield of the above ground plant mass and seed are determined. The yield of valuable compounds and energy efficiency of the crop are identified. High-yield forms with assigned features of crop yield, sugar content of plant biomass, total energy yield and biofuel output per one square unit are created. We proved that in the condition of crop introduction almost all forms of *Panicum virgatum* undergo full cycle of plant development — from the seed to the seed during one growing season, starting from the first-year. A phase of a seed maturation in the early developed plant forms begins in the third decade of September, in late developed forms until the middle of October, some forms have their growing season until the beginning of winter frosting. The major morphological features of plants are dependent on the forms and crops variations and ripening phase. Total harvest of the above ground mass and general output of the plant up till the flowering phase increases, where at the end of growing season decreases. We showed that plant forms with retard development had a high yield of above-ground mass for 58.0–115.6 % greater than the early developed plants. Increment in the dry matter content of plants from tiller to seed ripening phase is demonstrated. However, the percentage of sugars, ascorbic acid, carotene, and lipids is diminished. During the same growing season we did not observe any correlation between lignin and fiber accumulation. Similar results were acquired for the heat capacity harvest of above ground mass. High-yield *Panicum virgatum* crop provide substantial output of the dry mass, ethanol, and energy throughout all development phases of the plant. Among studied plant samples the top productivity was supplied by Zoryane cultivar.

Key words: *Panicum virgatum*, introduction, biomorphology, biochemical characteristics, productivity, biofuel.