Original researches

Morphometric Indices of Plants as a Basis for Determination of Biomass Yield of Switch Grass

M. J. Gumentyk, V. M. Kvak, G. S. Goncharuk

Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet of NAAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Received: 26 June 2020

Revised: 02 July 2020

Accepted: 03 July 2020

Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet
of NAAS of Ukraine, Klinichna Str., 25, Kyiv,
03141, Ukraine

Tel.: +38-068-327-28-59

E-mail: hmy@ukr.net

Cite this article: Gumentyk, M. J., Kvak, V. M., & Goncharuk, G. S.. (2020). Morphometric indices of plants as a basis for determination of biomass yield of switch grass. *Agrology*, 3(3), 160–163. doi: 10.32819/020018

Abstract. Among the significant number of grain cereals used for the production of solid kinds of biofuels in the form of fuel pellets and briquettes as the acceptable raw material is biomass of switch grass, or “virgate millet”. The main purpose of the research was to substantiate a new approach for determination of the optimal seeding rate and calculation of the yield of biomass of switch grass by means of application of morphometric indices of leaf surface area and mass of the aboveground part, determining the statistical relationships between them. It is determined that the leaf surface area and the mass of the aboveground part of the switch grass consist of the sum of the plant area; mathematical calculations based on correlations were used to obtain it. The correlation coefficient between the surface area of the leaves on the shoot and its height is calculated. The maximum leaf area of virgate millet plants can be achieved at a seeding rate of 4.0–4.5 million seeds/ha, which makes it possible to form in the first year of vegetation 70–80 plants per linear meter. The height of the stem and the number of leaves on it has the greatest influence on the leaf surface area and the mass of stems of switch grass plants. The close multiple correlations between the leaf surface area and the mass of the stem and its height and the number of leaves on it make it possible to calculate the leaf surface area and stem mass based on morphometric indices of switch grass plants. The results of determination of the indices of yield formation of switch grass depending on the morphometric data of the leaf surface area and the mass of the ground shoot are presented.

Keywords: switch grass; solid kinds of biofuels; leaf surface area; correlations; regression equations.

Морфометричні показники рослин як основа визначення врожайності біомаси проса прутіподібного

М. Я. Гументик, В. М. Квак, Г. С. Гончарук

Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН, м. Київ, Україна

Анотація. Серед значної кількості злакових культур, що використовуються для виробництва твердих видів біопалива у вигляді паливних гранул та брикетів, прийнятною сировиною є біомаса проса прутіподібного, або “світчграссу”. Головна мета досліджень полягала в обґрунтуванні нового підходу до встановлення оптимальної норми висіву насіння та розрахунку врожайності біомаси проса прутіподібного шляхом використання морфометричних показників площі листової поверхні та маси надземної частини, визначаючи статистичні залежності між ними. Визначено, що площа листової поверхні та маса надземної частини проса прутіподібного складаються зі суми площі рослини; для її отримання використовували математичні розрахунки на основі кореляційних зв’язків. Обчислено коефіцієнт кореляції між площею поверхні листків на пагоні та його висотою. Максимальних показників площі листя рослин проса прутіподібного можна досягти при нормі висіву насіння 4,0–4,5 млн насінин на 1 га, що дає можливість сформувати в перший рік вегетації 70–80 рослин на одному погонному метрі. Найбільший вплив на площу листової поверхні і масу стебел рослин проса прутіподібного чинять висота стебла та кількість листків на ньому. Тісні множинні кореляційні зв’язки між площею поверхні листя й масою стебла та його висотою і кількістю на ньому листків дають можливість розрахувати площу листової поверхні і масу стебел на основі морфометричних показників рослин проса прутіподібного. Наведено результати з визначення показників формування врожайності проса прутіподібного залежно від морфометричних даних площі листової поверхні та маси наземного пагона.

Ключові слова: просо прутіподібне; тверді види біопалива; площа листової поверхні; кореляційні зв’язки; рівняння регресії.

Вступ

Ґрунтово-кліматичні умови в Україні характеризуються як сприятливі для вирощування енергетичних культур з високим рівнем накопичення енергії в біомасі. Серед значної кількості

злакових культур, що використовуються для виробництва твердих видів біопалива у вигляді паливних гранул та брикетів, прийнятною сировиною визнана біомаса проса прутіподібного, або “світчграссу”. Просо прутіподібне вважається культурою “ідеального біопалива” внаслідок його здатності продукувати достатньо

велику кількість біомаси на маргінальних ґрунтах (Scagline et al., 2015). Біомаса свічграсу (*Panicum virgatum* L.) має високий вміст целюлози та лігніну, а отже, це високоякісна сировина для виробництва біополімерів (Butkutė et al., 2013; Cassie et al., 2015). Просо прутіподібне розмножують як насінням, так і ризомами. Серед переваг “свічграсу” варто назвати стійкість до ураження шкідниками й хворобами, сприяння покращенню якості ґрунту та фіксація вуглецю в ґрунті (Hartman et al., 2011; Rushing et al., 2013). Ця культура відзначається низькою собівартістю та мінімальним ризиком вирощування (Smeets et al., 2009). Найбільша складність у технології вирощування проса прутіподібного полягає в підвищеній чутливості рослин до умов життєзабезпечення в перший рік вегетації (Gumentyk & Kharytonov, 2018). Відомо, що саме в перший рік вирощування свічграс віддає до 30% свого потенціалу, на другий рік – до 70%. 100%-вого потенціалу культура може досягти на третій рік вирощування (Burlі et al., 2017). Залежно від умов вирощування, врожайність дворічних рослин може становити 9–18 т/га (Mitchell et al., 2012).

У зв'язку з підвищеним попитом на рослинну сировину проса прутіподібного для виробництва біопалива виникає потреба в розробці ефективних методик визначення врожайності біомаси та енергії, отриманої з енергетичної плантації високопродуктивних біоенергетичних культур. Формування врожаю біомаси злакових культур обумовлено факторами зовнішнього середовища та біологічними особливостями росту і розвитку рослин, де суттєве значення в ньому має площа листової поверхні. Вона знаходиться в прямій залежності від загального розвитку надземної маси рослини, оскільки більшу частину її становлять листки. Листкова поверхня відіграє основну роль в поглинанні CO₂ та продукуванні органічної речовини в процесі фотосинтезу (Kogut, 2014). Кількість поглиненої посівами злакових культур фотосинтетично активної радіації великою мірою визначається розміром асиміляційного апарату рослин. Важливою його характеристикою є листовий індекс, тобто площа зелених листків рослин на одиниці площі ґрунтового покриву (Nychyporovych, 1993). Встановлено, що зменшення асиміляційної поверхні рослин призводить до зниження їх продуктивності (Nychyporovych, 1982). Тобто загушення посівів та площі листового апарату є неефективним через зниження інтенсивності фотосинтезу. Розміщення листків з меншим кутом відхилення відносно стебла сприяє кращому проникненню сонячного світла і зростанню інтенсивності фотосинтезу. Отже, площа листової поверхні є цінним сільськогосподарським показником, який допомагає спланувати майбутній урожай біомаси, виявити стан розвитку рослин на час обліку тощо. Визначення площі листової поверхні є досить складним процесом, оскільки форма та розмір листків змінюються протягом усього вегетаційного періоду (Kvak et al., 2017). Крім того, форма листової пластинки дуже різноманітна, складно піддається вимірюванню (Макаренко, 2014). Ось чому розробка способів формування врожайності біомаси та методики визначення площі листової поверхні через обчислення морфометричних показників є важливою складовою розкриття енергетичного потенціалу перспектив-

ної біоенергетичної культури проса прутіподібного для виробництва біопалива.

Мета досліджень – розробити теоретичні основи розрахунку врожайності біомаси проса прутіподібного через використання морфометричних показників площі листової поверхні та маси надземної частини шляхом встановлення статистичних залежностей між ними. Для досягнення поставленої мети передбачалося вирішити такі завдання:

- 1) проранжувати морфометричні показники надземної частини рослин проса прутіподібного;
- 2) встановити множинні кореляційні зв'язки між морфометричними показниками рослин проса прутіподібного;
- 3) розрахувати рівняння множинної регресійної залежності площі листової поверхні та маси надземної частини від основних морфометричних показників рослин досліджуваної культури.

Матеріал та методи

Дослідження з визначення площі листової поверхні та маси надземної частини рослин проса прутіподібного сорту “Морозко” проводили на дослідних ділянках Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України протягом 2014–2019 рр. Роботи проводили з використанням загальноприйнятих наукових та спеціальних агрономічних методів досліджень (Yeshchenko et al., 2005). Експериментальні дані досліджень обробляли статистичними методами: парним та множинним кореляційним, регресійним аналізами в програмному середовищі Excel і Statistica 6.0 (Ermantaut et al., 2007). У рядку, який розташований на відстані не менше 3 м від країв дослідної ділянки, відбирали підряд щонайменше 20 рослин. Заміряли висоту рослин, кількість листків на них; потім рослини зрізали і визначали загальну площу листової поверхні та масу кожного стебла з листками. Після цього методом сканування визначали фактичну площу листової поверхні (Permyakov et al., 2002). Висоту стебла – відстань від поверхні ґрунту до верхівки листка – вимірювали рулеткою.

Результати

Важливе значення для максимальної урожайності біомаси проса прутіподібного має густота рослин, яка тісно пов'язана з нормою висіву насіння. Для реалізації повного енергетичного потенціалу культури потрібно враховувати особливості формування показників площі листової поверхні. У даному випадку враховували, що при збільшенні норми висіву площа листя однієї рослини буде зменшуватися, а це в свою чергу призводить до зниження врожайності біомаси в цілому. За результатами досліджень встановлено, що динаміка кількості рослин проса прутіподібного на одному погонному метрі рядка змінювалася в перший рік вегетації від 66 до 289 шт./пог.м у п'ятий рік. Аналогічні зміни відбувалися із приростом стебел протягом вегетаційного періоду по висоті, що суттєво позначалося на врожайності біомаси (таблиця).

Таблиця. Динаміка росту та розвитку рослин проса прутіподібного (*Panicum virgatum* L.) сорту “Морозко” (середнє за 2014–2019 рр.)

Рік вегетації рослин	Коефіцієнт щільності рослин на початок вегетації	Середина вегетації		Кінець вегетації	
		кількість рослин, шт./пог.м	висота стебел, см	кількість рослин, шт./пог.м	висота стебел, см
Перший	12,8	58	65	66	82
Другий	28,0	152	104	152	128
Третій	56,4	232	153	232	210
Четвертий	48,2	260	156	260	208
П'ятий	46,4	289	160	289	210

Аналіз результатів досліджень динаміки наростання біомаси проса прутіподібного сорту “Морозко” показав, що істотний вплив на врожайність біомаси протягом вегетаційного періоду мають кількість рослин на погонному метрі та висота стебел. Відповідно до проведених розрахунків і одержаних результатів аналізу розраховано залежності врожайності від висоти та кількості стебел проса прутіподібного – рис. 1.

Урожайність біомаси проса прутіподібного обумовлюється кількістю рослин на одиницю площі та довжиною стебла з листками. За результатами кореляційного аналізу встановлено, що між площею листової поверхні, масою надземної частини та морфометричними показниками стебла проса прутіподібного існують тісні кореляційні зв'язки. Для визначення площі листової поверхні розроблений метод вимірювання довжини і ширини листка емпіричним способом за допомогою перевідних коефіцієнтів, що відображають співвідношення між площею листка та добутком його довжини на ширину для рослин проса прутіподібного.

Результати дослідження з визначення площі листової поверхні рослин проса прутіподібного відображаються як добутки довжини та ширини листка (L та B), а також перевідного коефіцієнта (k). Для цього встановлено кореляційні залежності між площею листової поверхні та лінійними розмірами листка (L та B), побудовано графіки регресії, на основі яких розраховано перевідні коефіцієнти для проса прутіподібного. Проведено експериментальну перевірку і оцінку точності визначення площі поверхні листків різними способами, зокрема скануванням та розрахунковим методом.

Вдосконалено методику визначення площі листової поверхні методом вимірювання довжини і ширини листка та використання емпіричного способу за допомогою перевідних коефіцієнтів, що відображають співвідношення між площею листка та добутком його довжини на ширину.

Площу листової поверхні в дослідженнях визначали шляхом сканування листків щорічно. Залежність площі листової поверхні від розмірів листка обчислювали за допомогою кореляційного та регресійного аналізів. За контроль брали отримані значення площі методом сканування листків. Для проведення перевірки було визначено розрахунковим методом довжину і ширину.

Площу листків проса прутіподібного визначали за формулою

$$S = k \cdot L \cdot B \quad (1),$$

де S – площа поверхні листка, см^2 ;

k – безрозмірний емпіричний коефіцієнт, що відображає співвідношення між площею листка та добутком його довжини на ширину; L та B – довжина та ширина листка, см .

Коефіцієнт k визначали емпіричним способом за допомогою регресивного аналізу експериментальних даних.

Наведена методика дає можливість без зрізання листків біоенергетичних культур розрахунковим методом розраховувати площу листя рослини та врожайність біомаси. Встановлено тісні множинні кореляційні зв'язки між площею поверхні листя та масою стебла його висотою і кількістю на ньому листків. Для визначення характеру множинної кореляційної залежності застосовано методи множинного лінійного регресійного аналізу (рис. 2).

Встановлено, що залежність площі листової поверхні проса прутіподібного від висоти та кількості листків на стеблі виражається рівнянням:

$$S = -223,079 + 1,6006 \cdot h + 44,6875 \cdot n, \quad (2)$$

де S – площа поверхні листків на пагоні, см^2 ;

h – висота пагона, см ;

n – кількість листків на пагоні, шт.

Залежність маси наземної частини стебла проса прутіподібного від висоти та кількості листків на ньому виражається рівнянням

$$m = -64,5606 + 0,4129 \cdot h + 2,8235 \cdot n, \quad (3)$$

де m – маса пагона, г .

Рис. 1. Залежність урожайності рослин проса прутіподібного протягом вегетаційного періоду (середнє 2014–2019 рр.):
а – від висоти стебел; б – від кількості стебел

Рис. 2. Залежності: а – площі листової поверхні проса прутіподібного від довжини стебла та кількості листків на ньому;
б – маси наземної частини стебла проса прутіподібного від його довжини та кількості листків на ньому

Використовуючи залежності (2) та (3), можна розрахувати площу листової поверхні і масу рослини на основі їх морфометричних показників висоти стебла та кількості листків на ньому.

Обговорення

Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААНУ понад 10 років поспіль проводить дослідження з новими високопродуктивними культурами, біомаса яких використовується для виробництва біопалива. Для проведення біологічних та агротехнічних досліджень часто виникає необхідність визначення площі листової поверхні та маси надземної частини багаторічних злакових рослин в динаміці використовують різні способи визначення цих показників (Berson & Nazarova, 2008; Williams & Martinson, 2003; Montero et al., 2000; Stickler et al., 1961). Проте існує ряд досліджень (вегетаційні, лізиметричні, ботанічні колекції, селекційні номери, тощо) у яких кількість рослин обмежена. Ось чому необхідно користуватись неруйнівними (не пов'язано зі знищенням рослин) методами, які пов'язані з математичними залежностями на основі кореляційних зв'язків (Konlov, 1970; Kvak et al., 2017; Tanchyk & Mokriyenko, 2008). Крім того, для оцінки стану існуючих плантацій проса прутноподібного застосовують експрес методи, які дозволяють оперативно та з достатнім рівнем точності визначати врожайність культури та кількість виходу енергії (Belan, 2012). Певна перспектива пов'язана і з використанням кореляційних залежностей площі листової поверхні та маси надземної частини від морфометричних показників для оцінки стану та прогнозу врожайності рослин (Hanzhenko et al., 2014). Нашими дослідженнями встановлені стохастичні залежності площі листової поверхні та маси надземної частини рослин проса прутноподібного від його морфометричних показників.

Висновки

1. Максимальних показників площі листя рослин проса прутноподібного можна досягти при нормі висіву насіння 4,0–4,5 млн.шт./га, що дає можливість сформувати в перший рік вегетації 70–80 рослин на погонному метрі.

2. Найбільший вплив на площу листової поверхні і масу стебел рослин проса прутноподібного чинять висота стебла та кількість на ньому листків. Тісні множинні кореляційні зв'язки між площею поверхні листя, масою стебла і висотою та кількістю листків дають можливість розрахувати площу листової поверхні і масу стебел на основі їх морфометричних показників.

3. Площу листової поверхні проса прутноподібного можна визначити розрахунковим методом. Вона дорівнює добутку довжини, ширини листка та перевідного коефіцієнта форми листка. Даний спосіб дає змогу визначати площу листків без зрізання рослин проса прутноподібного при похибці $\pm 4,0\%$.

У перспективі дослідження полягатимуть у порівнянні деяких морфометричних показників рослин з результатами дистанційного зондування стану посівів за допомогою дронів та з подальшою оцінкою проєктивного покриття та індексу листової поверхні рослин.

References

Belan, S. S. (2012). Method for determination of the leaf area of rare and protected plant species using non-destructive morphometry methods (case study of the Orchidaceae Juss. family). *Herald of Sumy National Agrarian University. Agronomy and Biology*, 2, 17–21 (in Ukrainian).

Berson, G. Z., & Nazarova, M. L. (2008). Determination of the assimilation apparatus of tomato by calculation. *Basic Research*, 8, 60–61 (in Russian).

Burli, P., Forgoston, E., Lal, P., Billings, L., Wolde, B. (2017). Adoption of switchgrass cultivation for biofuel under uncertain-

ty: A discrete-time modeling approach. *Biomass and Bioenergy*, 105, 107–115. doi: [10.1016/j.biombioe.2017.06.012](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.06.012)

Butkutė, B., Lemežienė, N., Cesevičienė, J., Liatukas, Z., & Dabkevičienė, G. (2013). Carbohydrate and lignin partitioning in switchgrass (*Panicum virgatum* L.) biomass as a bioenergy feedstock. *Zemdirbyste-Agriculture*, 100(3), 251–260.

Cassie, M. W., Balasubramanian, V. K., Petti, C., Rai, K. M., De Bolt S., Mendu, V. (2015). Engineering Plant Biomass Lignin Content and Composition for Biofuels and Bioproducts. *Energies*, 8, 7654–7676. doi: [10.3390/en8087654](https://doi.org/10.3390/en8087654)

Ermantraut, E. R., Prysiazhniuk, O. I., & Shevchenko, I. L. (2007). Statistical analysis of agronomic research data in package Statistica 6.0. Polihraf Konsaltnh, Kyiv (in Ukrainian).

Gumentyk, M., & Kharytonov, M. (2018) Development and assessment of technologies of Miscanthus and Switchgrass growing in forest-steppe zone of Ukraine. *Agriculture and Forestry Journal*, 64(2), 137–146. doi: [17707/AgricForest.64.2.10](https://doi.org/10.17707/AgricForest.64.2.10)

Hanzhenko, O. M., Kurylo, V. L., Hamandii, V. L., Khivrych, O. B., Zykov, P. Y., Kvak, V. M., & Herasymenko, L. A. (2014). Methodical recommendations for determining the area of the leaf surface of sugar sorghum. *Nilan-LTD, Vinnytsia* (in Ukrainian).

Hartman, J. C., Nippert, J. B., & Orozco, R. A. (2011) Potential ecological impacts of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) biofuel cultivation in the Central Great Plains, USA, Springer. *Biomass and bioenergy*, 35, 3415–3421. doi: [10.1016/j.biombioe.2011.04.055](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.04.055)

Kogut, I. M., (2014). Leaf surface area and photosynthetic potential of winter wheat plants depending on preparators and varieties. *Sotsium. Nauka. Kultura*.

Kvak, V. M., Hanzhenko, O. M., Zykov, P. Y., & Khivrych, O. B. (2017). Method for determination of leaf area in miscanthus. *Advanced agritechnologies*, 5 (in Ukrainian). Retrieved from <http://jna.bio.gov.ua/article/view/122228>

Makarenko, L. O. (2016). The determination of safflower's leaf area with morphometric method. *Plant breeding and seed production*, 110, 185–191. doi: [10.30835/2413-7510.2016.87627](https://doi.org/10.30835/2413-7510.2016.87627)

Mitchell, R., Vogel, K. P., & Uden, D. R. (2012). The feasibility of switchgrass for biofuel production. *Nebraska Cooperative Fish & Wildlife Research Unit – Staff Publications. Biofuels*, 3(1), 47–59.

Montero, F. J., de Juan, J. A., Cuesta, A., & Brasa, A. (2000). Nondestructive methods to estimate leaf area in *Vitis vinifera* L. *Hort. Sci.*, 35(4), 696–698.

Nychyporovych, A. A. (1969). Guidelines for accounting and control of the most important indicators of plant photosynthetic activity in crops. *VASHNYL, Moscow* (in Russian).

Nychyporovych, A. A. (1982). Physiology of photosynthesis and plant productivity. *Moscow* (in Russian).

Permyakov, A. N., Vasin, V. G., Tolpekin, A. A., & Zuev, E. V. (2002). Method for determining leaf area using the program for determining the area AREAS 2.1. *GSKhA, Samara* (in Russian).

Rushing, J. B., Baldwin, B. S., Taylor, A. G., Owens, V. N., Fike, J. H., & Moore, K. J. (2013). Seed safening from herbicidal injury in switchgrass establishment. *Crop Sci.*, 53, 1–8. doi: [10.2135/cropsci2013.01.0050](https://doi.org/10.2135/cropsci2013.01.0050)

Scagline, S., Skousen, J., & Griggs, T. (2015). Switchgrass and miscanthus yields on reclaimed surface mines for bioenergy production. *JASMR*, 4(2), 80–90. doi: [10.21000/JASMR15020080](https://doi.org/10.21000/JASMR15020080)

Smeets, E. M. W., Lewandowski, I. M., & Faaij, A. P. C. (2009). The economical and environmental performance of miscanthus and switchgrass production and supply chains in a European setting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1230–1245. doi: [10.1016/j.rser.2008.09.006](https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.006)

Stickler, F., Wearden, S., & Pauli, A. (1961). Leaf area determination in grain sorghum. *Agronomy Journal*, 53, 187–188.

Tanchyk, S. P. & Mokriyenko, V. A. (2008). Formulation of optimum square of asymylative cover – possibility to get high yield of corn grain. *Hymyya. Agronomiyya. Servys*, 4, 12–15.

Williams, L., & Martinson, T. E. (2003). Nondestructive leaf area estimation of 'Niagara' and 'De Chaunac' grapevines. *Science Horticulture*, 98, 493–498. doi: [10.1016/S0304-4238\(03\)00020-7](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(03)00020-7)

Yeshchenko, V. O., Kopytko, P. G., Opryshko, V. P., & Kostogryz, P. V. (2005). Base of scientific research in agronomy. *Diya, Kyiv* (in Ukrainian).