


## АГРОНОМІЯ

УДК 633.62

## Енергетична продуктивність сорго цукрового залежно від строків збирання урожаю в центральній частині Лісостепу України

Ганженко О.М. 

Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН

 Ganzhenko74@gmail.com

Ганженко О.М. Енергетична продуктивність сорго цукрового залежно від строків збирання урожаю в центральній частині Лісостепу України. Збірник наукових праць «Агробіологія», 2021. № 1. С. 23–31.

Ganzhenko O.M. Energetychna produktyvnysh' sorogo cukrovogo zalezno vid strokiv zbyrannja urozhajju v central'nij chastyini Lisostepu Ukraїny. Zbirnyk naukovykh prac' «Agrobiologija», 2021. no. 1, pp. 23–31.

Рукопис отримано: 09.02.2021 р.  
Прийнято: 24.02.2021 р.  
Затверджено до друку: 25.05.2021 р.

doi: 10.33245/2310-9270-2021-163-1-23-31

У зв'язку з глобальними змінами клімату сорго цукрове (*Sorghum saccharatum*) є найбільш перспективною рослиною у світі, біомасу якої використовують для виробництва різних видів біопалива.

У статті наведено результати досліджень щодо встановлення залежності показників енергетичної продуктивності сорго цукрового від сортових особливостей (сорти Силосне 42 і Фаворит та гібриди Довіста і Медовий F1) та строків збирання зеленої біомаси.

Мета досліджень – виявити вплив сортових особливостей та строків збирання урожаю на енергетичну продуктивність сорго цукрового у зоні нестійкого зволоження Центрального Лісостепу України.

Предмет досліджень – показники енергетичної продуктивності сорго цукрового (врожайність зеленої біомаси; цукристість соку; вихід біогазу, біоетанолу, твердого біопалива; загальний вихід енергії).

Дослідження проводили впродовж 2016–2020 років в зоні нестійкого зволоження центральної частини Лісостепу України в умовах Білоцерківської дослідно-селекційної станції Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України.

Встановлено, що найбільший вихід біопалива та енергії (до 791,8 ГДж/га) досягається за вирощування сорго цукрового гібрида Довіста за умови збирання його біомаси у фазу повної стиглості насіння (початок жовтня). Збирання біомаси сорго цукрового на біогаз доцільно розпочинати не раніше фази викидання волоті. Для забезпечення максимального виходу біоетанолу оптимальними строками збирання зеленої біомаси сорго цукрового є II декада вересня – I декада жовтня, а максимальний вихід твердого біопалива досягається за збирання біомаси не раніше фази воскової стиглості зерна. На формування урожаю зеленої біомаси сорго цукрового найбільше впливали погодні умови (47,4 %), меншим був вплив сортових особливостей (17,8 %) та строків збирання (12,8 %), а на вихід енергії найбільший вплив чинили строки збирання біомаси (37,4 %). Встановлено тісну лінійну кореляційну залежність виходу енергії від врожайності зеленої ( $R^2=0,81$ ) та сухої біомаси ( $R^2=0,99$ ). Найбільш екологічно пластичним за показником загального виходу енергії з одиниці площі виявився гібрид Медовий F1 ( $b=1,62$ ), що свідчить про перспективність вирощування цього гібрида за сприятливих погодних умов та належного рівня агротехніки.

**Ключові слова:** сорго цукрове, сортові особливості, строки збирання, вихід енергії, вихід біопалива, продуктивність.

**Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень.** У зв'язку з глобальними змінами клімату сорго цукрове (*Sorghum saccharatum*) є найбільш перспективною рослиною у світі, біомасу якої використовують для виробництва різних видів біопалива. Перевагами сорго є швидкі темпи приросту біомаси, ранні строки дозрівання, ефективне використання води та обмежена потреба у добривах [1, 2, 3, 4].

Невдовзі дефіцит вологи стане домінуючим чинником, який стримуватиме розвиток аграрного виробництва. За вегетаційний період сорго цукрове потребує у 4 рази менше води порівняно з цукровою тростиною, тому передбачається, що посіви сорго цукрового витіснять цукрову тростину (*Saccharum officinarum*) та інші цукроносні й кормові культури [5, 6, 7].

Сорго цукрове належить до С4 рослин, які більш ефективно використовують світло, воду та елементи живлення порівняно з С3 рослинами [8]. Крім того, сорго цукрове більш посухостійка культура, ніж цукрова тростина (*Saccharum officinarum*) та кукурудза (*Zea mays*), які нині використовують для виробництва біопалива у світі [1]. Виробництво і використання біоетанолу, виготовленого з біомаси сорго цукрового, дає змогу більш як на 70 % зменшити викиди парникових газів [9].

Отже, набуває актуальності питання дослідження впливу елементів технології вирощування сорго цукрового на показники продуктивності та якості його біомаси. Такі дослідження проводять здебільшого в країнах з теплим та посушливим кліматом, таких як: Індія [7], США [10, 11], Пакистан [3, 4], Туреччина [12], країни Африки [13].

Відомо, що урожайність зеленої біомаси сорго цукрового та вихід біоетанолу значно залежать від сортових особливостей, а також від строків сівби насіння та строків збирання зеленої біомаси. Встановлено, що у південно-західних штатах США найбільший розрахунковий вихід біоетанолу було отримано за сівби насіння у травні, а ступінь впливу строків сівби насіння на продуктивність сорго цукрового значно залежала від його сортових особливостей [10]. Іншими дослідженнями було встановлено, що ранні строки сівби насіння сорго цукрового дають змогу на 13 % збільшити вихід біоетанолу [11].

Дослідженнями, які проводили у теплих і посушливих умовах Азії встановлено, що збільшення вегетаційного періоду з 60 до 120 діб сприяє підвищенню сухої біомаси сорго цукрового на 48 % [3]. Заразом, подовження періоду вегетації рослин призводило до зростання вмісту целюлози, геміцелюлози та лігніну, що зменшувало питомий вихід біометану [3]. Ранні і пізні строки сівби насіння сорго цукрового в цих умовах зменшували врожайність сухої біомаси на 23 % [4].

Турецькими вченими встановлено, що збирання стебел сорго цукрового у більш пізні строки сприяє збільшенню висоти рослин, врожаю зеленої і сухої біомаси та вмісту в ній лігніну. Під час збирання сорго цукрового у періоди викидання волотей і молочної стиглості зерен вміст сухої речовини не перевищував 24,7 % [12]. Отже, найкращим строком збирання сорго цукрового для кормів є фаза воскової або повної стиглості. Збирання зеленої біомаси сорго цукрового до настання фази воскової стиглості унеможливає подальше її силосування незалежно від сортових особливостей [12].

Дослідженнями, проведеними в Кенії встановлено, що строки збирання біомаси сорго цукрового є важливим чинником, що впливає на вміст цукру і вихід біопалива. Результати досліджень довели, що збирання зеленої біомаси сорго цукрового через 104–117 діб після сівби насіння найбільш оптимальні для виробництва біоетанолу [13].

Широкомасштабні дослідження, які були проведені в чотирьох різних регіонах Індії довели, що найвищу врожайність зеленої біомаси, вихід соку та вміст цукрів у соці відмічали за сівби насіння сорго цукрового у червні. За цього строку сівби отримали максимальний вихід біоетанолу для усіх 12 сортів сорго цукрового, які досліджували [7].

Українськими дослідниками встановлено, що ранні строки сівби насіння сорго цукрового (III декада квітня) зменшують урожайність його зеленої біомаси на 6,6 т/га, цукристість соку – на 0,5 %, вихід біоетанолу – на 0,34 т/га порівняно з оптимальними строками (I–II декади травня) [14]. За сівби насіння сорго цукрового в II декаді травня показники фотосинтетичної продуктивності були максимальними [15], а засміченість посівів бур'янами – мінімальною [16]. Найбільший вихід твердого біопалива у правобережній частині Лісостепу України було отримано за ширини міжрядь 45 см та густоти стояння рослин сорго цукрового 250 тис. шт./га [17]. Вітчизняними вченими також відмічено, що оптимальні строки та способи збирання біомаси сорго цукрового залежать від сортових особливостей, погодних умов, а також від способів подальшого використання зібраної біомаси: для виробництва біогазу чи біоетанолу [18].

Отже, попри значну кількість наукових публікацій з результатами досліджень щодо технологічних аспектів вирощування сорго цукрового на енергетичні цілі, невирішеним залишається питання оцінювання енергетичного потенціалу сучасних сортів сорго цукрового в умовах Центрального Лісостепу України.

**Мета дослідження** – виявити вплив сортових особливостей та строків збирання врожаю на енергетичну продуктивність сорго цукрового у зоні нестійкого зволоження Центрального Лісостепу України.

**Матеріал і методи дослідження.** Дослідження проводили впродовж 2016–2020 рр. у зоні нестійкого зволоження центральної частини Лісостепу України на полях Білоцерківської дослідно-селекційної станції ІБКіЦБ НААН за схемою двофакторного дослідження (табл. 1). Площа посівної ділянки 54 м<sup>2</sup>, облікової – 28,8 м<sup>2</sup>. Повторність дослідження – чотириразова. Загальна площа дослідження – 0,37 га.

Таблиця 1 – Схема досліджу

Чинник А: Сортові особливості		Чинник Б: Строки збирання	
A1	Силосне 42 (середньостиглий)	B1	I декада серпня
A2	Довіста (середньопізній)	B2	III декада серпня
A3	Медовий F1 (середньоранній)	B3	II декада вересня
A4	Фаворит (середньостиглий)	B4	I декада жовтня

Дослід закладається за методом систематичних повторювань: у кожному повторенні варіанти досліджу розміщують на ділянках послідовно. Сівбу насіння сорго цукрового проводять на глибину 4–6 см із шириною міжрядь 45 см та густотою стояння рослин 200 тис. шт./га (9,0 схожих насінин на 1 м рядка).

Дослідження проводили на чорноземах типових крупнопилуватого середньосуглинкового механічного складу, з глибиною гумусового шару від 1,0 до 1,2 м з вмістом гумусу в орному шарі (0–30 см) 3,9 %, що характерно для малогумусних чорноземів. Реакція ґрунтового розчину – близька до нейтральної (рН сольової витяжки становить 6,5). Лужногідролізованого азоту в орному шарі ґрунту – 134 мг (за Тюриним); рухомих форм фосфору – 160 мг (за Кірсановим); обмінного калію – 96 мг (за Чіріковим) на 1 кг ґрунту.

Температурний режим за роки досліджень був без значних коливань, однак з перевищенням середніх багаторічних показників. У 2016 році за період вегетації температура повітря була більшою за середні багаторічні значення на 2,5 °С. За кількістю опадів 2016 рік відзначився нерівномірністю їх випадання, у квітні та травні опадів випало більше відповідно на 12,4 та 49,2 мм від середніх багаторічних, однак у червні, липні, серпні та вересні опадів випало менше відповідно на 35,3; 60,5; 38,0 та 30,4 мм.

У 2017 році температура повітря за вегетаційний період була вищою за середні багаторічні показники на 1,9 °С. Загалом за вегетаційний період кількість опадів у 2017 році була меншою на 159,2 мм від середніх багаторічних значень. Зокрема, у квітні, червні, липні та серпні кількість опадів була меншою за середні багаторічні показники на 32,1; 46,3; 36,9 та 43,9 мм відповідно, у травні і вересні кількість опадів була майже на рівні з багаторічними даними.

У 2018 році за період вегетації температура повітря була більшою за багаторічні значення на 2,9 °С. Кількість опадів за вегетаційний період була нижчою за середні багаторічні показники на 84,8 мм. Слід зазначити, що у червні та вересні кількість опадів перевищила середні багаторічні показники на 11 та 20,2 мм, тимчасом у квітні, травні, липні та серпні їх кількість була нижчою на 36,8; 2,4; 31,8 та 45,0 мм.

У 2019 році температура повітря в середньому за вегетаційний період перевищувала

багаторічні дані на 1,8 °С. За кількістю опадів 2019 рік відзначився певною нерівномірністю випадання опадів. У травні та червні їх кількість перевищувала середні багаторічні показники на 28,8 та 26,7 мм відповідно. У квітні, липні, серпні та вересні їх кількість була меншою за середні багаторічні показники відповідно на 14,8; 61,9; 38,6 та 12,9 мм.

У 2020 році температура повітря за місяцями була вищою за середні багаторічні показники, і в середньому за вегетаційний період перевищувала на 1,4 °С. Слід зазначити, що 2020 рік був посушливим, оскільки кількість опадів була значно меншою за середні багаторічні дані. У квітні, червні, липні та вересні кількість опадів була меншою за середні багаторічні показники на 32,0; 46,7; 62,8 та 12,3 мм відповідно, у травні та серпні їх кількість дещо перевищила середні багаторічні дані на 44,7 та 6,6 мм.

Розрахунок виходу біопалива та енергії проводили відповідно до методичних рекомендацій [18].

Отримані експериментальні дані обробляли статистично з використанням дисперсійного, кореляційного та регресійного аналізів [19, 20].

**Результати дослідження та обговорення.** За результатами досліджень встановлено, що за першого строку збирання (I декада серпня) врожайність зеленої біомаси сорго цукрового у середньому за 2016–2020 рр. була найменшою і становила для гібридів Довіста і Медовий F1 відповідно 78,9 та 83,8 т/га, а для сортів Фаворит та Силосне 42 – 70,1 та 67,6 т/га відповідно (табл. 2). Перенесення строків збирання на кінець серпня дало змогу підвищити врожайність зеленої біомаси в середньому на 28,8 %. Так, врожайність зеленої біомаси гібридів Довіста і Медовий F1 зросла до 111,4 та 106,9 т/га, а сортів Фаворит та Силосне 42 – до 87,1 та 81,6 т/га відповідно. Подальше перенесення строків збирання на середину вересня дало змогу підвищити врожайність зеленої біомаси гібридів Довіста і Медовий F1 до 128,6 та 107,0 т/га, а сортів Фаворит і Силосне 42 – до 91,9 та 83,0 т/га. У більш пізній строк збирання (початок жовтня) спостерігалось незначне зменшення врожайності зеленої біомаси для гібрида Медовий F1 та сорту Фаворит та незначне збільшення для сорту Силосне 42 і гібрида Довіста.

Таблиця 2 – Показники енергетичної продуктивності сорго цукрового залежно від сортових особливостей та строків збирання (середнє за 2016–2020 рр.)

Чинник А Строки збирання	Чинник Б Сортові особливості	Урожайність зеленої біомаси, т/га	Цукри- стість соку, %	Розрахунковий вихід біопалива			Вихід енергії, ГДж/га
				біогазу, тис.м <sup>3</sup> /га	біоетано- лу, т/га	твердого біопалива, т/га	
Строк 1 (I декада серпня)	Силосне 42	67,6	6,6	7,4	1,0	11,6	209,8
	Довіста	78,9	6,2	8,6	1,1	13,6	244,9
	Медовий F1	83,8	6,8	9,5	1,3	14,9	270,2
	Фаворит	70,1	5,5	7,1	0,9	11,1	199,5
Строк 2 (III декада серпня)	Силосне 42	81,6	11,6	13,4	2,2	21,0	389,6
	Довіста	111,4	12,0	18,5	3,1	29,0	541,1
	Медовий F1	106,9	14,2	18,8	3,4	29,5	557,0
	Фаворит	87,1	10,8	13,5	2,1	21,1	390,5
Строк 3 (II декада вересня)	Силосне 42	83,0	13,3	14,7	2,5	23,1	431,3
	Довіста	128,6	13,8	24,4	4,1	38,4	715,5
	Медовий F1	107,0	15,4	20,4	3,8	32,0	605,2
	Фаворит	91,9	13,0	16,3	2,7	25,7	478,1
Строк 4 (I декада жовтня)	Силосне 42	84,7	14,2	15,6	2,7	24,5	460,4
	Довіста	135,6	16,1	26,6	5,0	41,7	791,8
	Медовий F1	106,6	17,0	21,0	4,3	33,0	634,3
	Фаворит	88,8	15,4	16,5	3,1	25,9	491,6
НІР <sub>0,05</sub>		4,3	0,7				

Виявлено, що на ранніх фазах розвитку рослин сорго цукрового (до фази викидання волоті) цукристість соку є невисокою і коливається в межах від 5,5 (сорт Фаворит) до 6,8 % (гібрид Медовий F1). За збирання біомаси у фазу викидання волоті (кінець серпня) концентрація вуглеводів у соці стебел зростає приблизно в 1,9 раза і становить у гібридів Довіста і Медовий F1 відповідно 12,0 і 14,2 %, а у сортів Фаворит і Силосне 42 – 10,8 і 11,6 % відповідно. Перенесення строків збирання на середину вересня забезпечило зростання вмісту вуглеводів у соці в середньому на 14,1 %, водночас максимальні показники цукристості були у гібридів Довіста (13,8 %) та Медовий F1 (15,4 %). У фазі повної стиглості зерна у зоні нестійкого зволоження Центрального Лісостепу України рослини сорго цукрового накопичили максимальну кількість цукрів у соці, водночас найбільша цукристість соку була у гібридів Довіста (16,1 %) і Медовий F1 (17,0 %), у сортів Фаворит та Силосне 42 цей показник становив відповідно 15,4 та 14,2 %.

Розрахунковий вихід біогазу з біомаси сорго цукрового, зібраної у фазі інтенсивного росту (кінець липня – початок серпня), є незначним і коливається в межах від 7,1 (сорт Фаворит) до 9,5 тис. м<sup>3</sup>/га (гібрид Медовий F1). З кожним наступним строком збирання вихід біогазу для усіх досліджуваних сортів і гібридів зростає, що пов'язано зі зростанням урожайності зеленої біомаси та вмісту сухої речовини. Так, за збирання біомаси у кінці серпня вихід біогазу зростає у середньому майже у 2 рази порівняно

зі збиранням на початку місяця, і становить для гібридів Довіста і Медовий F1 відповідно 18,5 та 18,8 тис. м<sup>3</sup>/га, а для сортів Фаворит і Силосне 42 – 13,5 та 13,4 тис. м<sup>3</sup>/га відповідно.

Перенесення строків збирання на середину вересня дає змогу збільшити вихід біогазу в середньому на 18,4 % порівняно з попереднім строком. Максимальний вихід біогазу отримано за збирання сорго цукрового у фазі повної стиглості зерен, водночас вихід біогазу з гібридів Довіста і Медовий F1 становить відповідно 26,6 та 21,0 тис. м<sup>3</sup>/га, а з сортів Фаворит та Силосне 42 – 16,5 та 15,6 тис. м<sup>3</sup>/га.

Отже, збирання біомаси сорго цукрового на біогаз у зоні нестійкого зволоження Східного Лісостепу України доцільно розпочинати не раніше фази викидання волоті.

Результати досліджень свідчать, що збирання біомаси сорго цукрового у фазі інтенсивного росту на біоетанол не доцільне, оскільки внаслідок низького вмісту цукрів вихід біоетанолу не перевищує 1,28 т/га. Починаючи з фази викидання волотей, спостерігається суттєве збільшення виходу біоетанолу з біомаси сорго цукрового більш як у 2,5 раза. Так, вихід біоетанолу з гібридів Довіста і Медовий F1 за збирання їх біомаси у кінці серпня становить відповідно 3,11 та 3,44 т/га, а з сортів Фаворит і Силосне 42 – 2,11 та 2,16 т/га. Подальше перенесення строків збирання на середину вересня дало змогу підвищити вихід біоетанолу в середньому за сортами на 20,7 % порівняно з попереднім строком збирання. Перенесення строків збирання ще на 20 діб (початок жовт-

ня) дало змогу підвищити середній за сортами вихід біоетанолу ще на 16 %. За збирання біомаси у фазі повної стиглості зерна вихід біоетанолу з гібридів Довіста і Медовий F1 становив відповідно 5,02 та 4,29 т/га, а з сортів Фаворит і Силосне 42 – 3,11 та 2,74 т/га.

Отже, для максимальної реалізації біологічного потенціалу рослин сорго цукрового щодо виходу біоетанолу оптимальними строками збирання зеленої біомаси в зоні нестійкого зволоження Центрального Лісостепу України є І декада вересня – І декада жовтня.

Вихід твердого біопалива безпосередньо залежить від урожайності сухої речовини, тому враховуючи низьку врожайність зеленої біомаси та низький вміст у ній сухої речовини на початкових фазах розвитку рослин сорго цукрового (до фази викидання волоті), вихід твердого біопалива за раннього строку збирання біомаси не перевищував 14,9 т/га. За збирання біомаси сорго цукрового у кінці серпня вихід твердого біопалива зростає майже удвічі і становить: для гібридів Довіста і Медовий F1 відповідно 29,0 та 29,5 т/га, а для сортів Фаворит і Силосне 42–21,1 та 21,0 т/га. Подальше перенесення строків збирання на середину вересня дало змогу збільшити вихід твердого біопалива в середньому на 18,4 %. Найбільший вихід твердого біопалива отримано за четвертого строку збирання (початок жовтня): для гібридів Довіста і Медовий F1 відповідно 41,7 та 33,0 т/га, а для сортів Фаворит і Силосне 42 – 25,9 та 24,5 т/га.

Отже, максимальний вихід твердого біопалива з сорго цукрового досягається за збирання біомаси не раніше фази воскової стиглості зерна.

Виявлено, що в разі раннього збирання біомаси сорго цукрового (кінець липня – початок серпня) загальний вихід енергії не перевищує 270,2 ГДж/га, що пояснюється низькою врожайністю зеленої біомаси у цей час та низькою концентрацією у ній сухої речовини, зокрема цукрів. Перенесення строків збирання на 20 діб (на кінець серпня) дає змогу підвищити вихід енергії більш як у 2 рази. Так, за збирання сорго цукрового у ІІІ декаді серпня вихід енергії з біомаси гібридів Довіста і Медовий F1 становив відповідно 546,1 та 557,0 ГДж/га, а з біомаси сортів Фаворит і Силосне 42 – 390,5 та 389,6 ГДж/га. Завдяки збільшенню вмісту сухої речовини та вуглеводів у біомасі сорго цукрового у фазах воскової та повної стиглості насіння вихід енергії також зростає. Так, за збирання біомаси в середині вересня вихід енергії коливається від 431,3 (сорт Силосне 42) до 715,5 ГДж/га (гібрид Довіста). Перенесення строків збирання ще на 20 діб (на початок жовтня) дає

змогу несуттєво збільшити загальний вихід енергії (лише на 6,6 %), однак за таких умов є ризик вилягання рослин, що ускладнює процес їх збирання.

Отже, для максимальної реалізації енергетичного потенціалу рослин сорго цукрового збирання зеленої біомаси слід проводити не раніше фази воскової стиглості зерен. За виходом енергії з одиниці площі, починаючи із фази воскової стиглості зерна, гібрид Довіста значно переважав інші досліджувані сорти і гібриди.

За результатами дисперсійного аналізу встановлено, що в зоні нестійкого зволоження центральної частини Лісостепу України на формування врожаю зеленої біомаси сорго цукрового найбільше впливали погодні умови (47,4 %), меншим був вплив сортових особливостей (17,8 %) та строків збирання (12,8 %). Однак, на вихід енергії найбільший вплив чинили строки збирання біомаси (37,4 %), а вплив погодних умов (26,9 %) та сортових особливостей (13,3 %) був меншим (рис. 1). Це пояснюється тим, що вихід енергії більше залежить від врожайності сухої біомаси, ніж від зеленої.

Результати регресійного аналізу підтверджують більш тісну залежність виходу енергії від урожайності сухої біомаси, оскільки коефіцієнт детермінації між виходом енергії та врожайністю зеленої біомаси становив  $R^2=0,81$  (рис. 2а), а між виходом енергії та врожайністю сухої біомаси –  $R^2=0,99$  (рис. 2б). Крім того, коефіцієнт рівняння регресійної залежності виходу енергії від врожайності зеленої біомаси менший порівняно з відповідним коефіцієнтом для сухої біомаси ( $b_1=6,39 < b_2=20,93$ ).

Строкатість погодних умов за роки проведення досліджень дала змогу провести оцінювання екологічної пластичності та стабільності досліджуваних сортів та гібридів сорго цукрового. Попри те, що за середніми показниками енергетичної продуктивності середньопізній гібрид Довіста був попереду інших досліджуваних сортів і гібридів сорго цукрового, за рівнем екологічної пластичності він поступився середньоранньому гібриду Медовий F1 (рис. 3). Так, за показником виходу енергії найбільш пластичним був гібрид Медовий F1 ( $b=1,60$ ). Дещо поступався йому гібрид Довіста ( $b=1,15$ ). Екологічна пластичність досліджуваних сортів за показником виходу енергії була значно нижчою і становила  $b=0,58$  для сорту Фаворит та  $b=0,67$  для сорту Силосне 42. Водночас досліджувані сорти забезпечували високі показники стабільності, що свідчить про те, що їх вирощування у цій зоні забезпечує хоч і не високий, однак стабільний вихід енергії з одиниці площі навіть за несприятливих погодних умов.

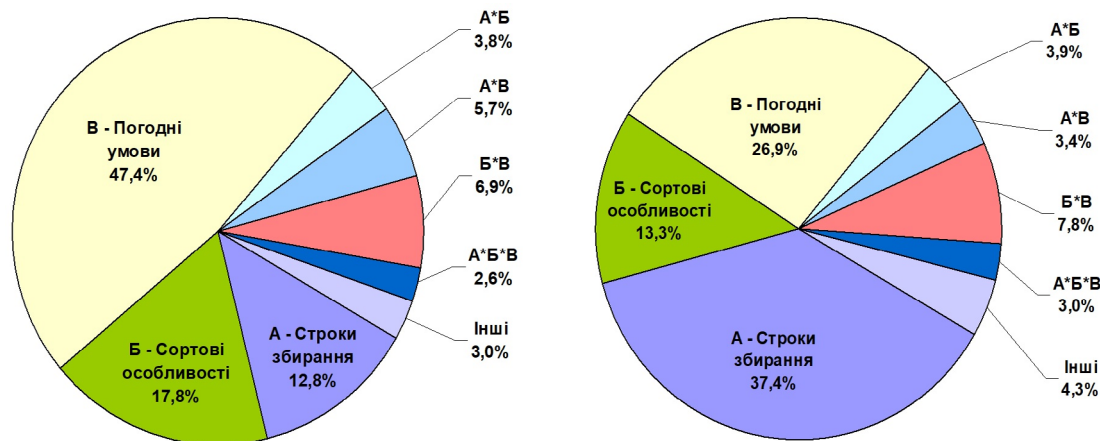


Рис. 1. Вплив досліджуваних чинників на:  
а) урожайність зеленої біомаси; б) вихід енергії.

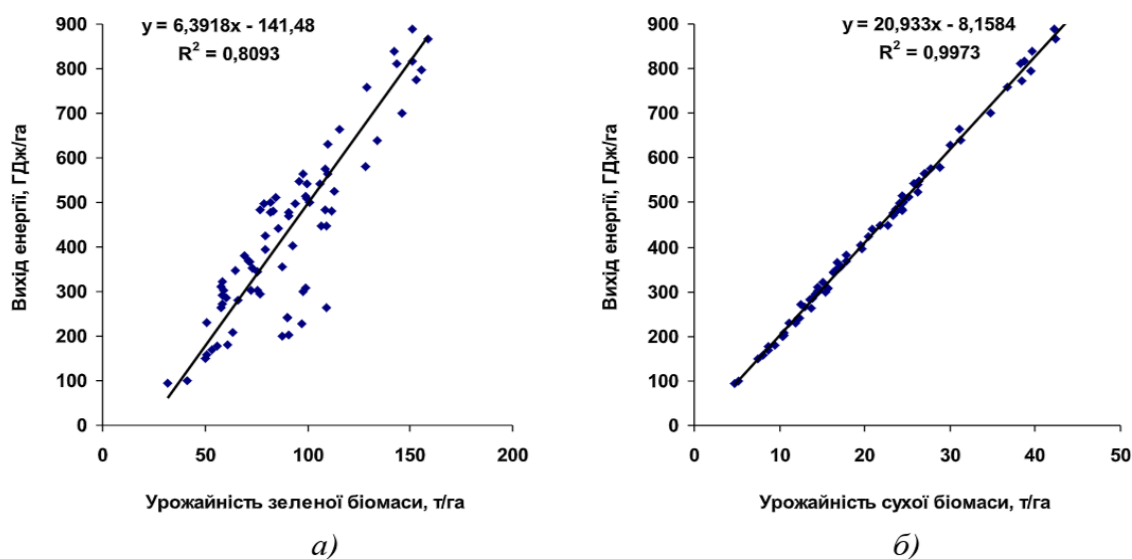


Рис. 2. Регресійна залежність виходу енергії від:  
а) урожайності зеленої біомаси; б) урожайності сухої біомаси.

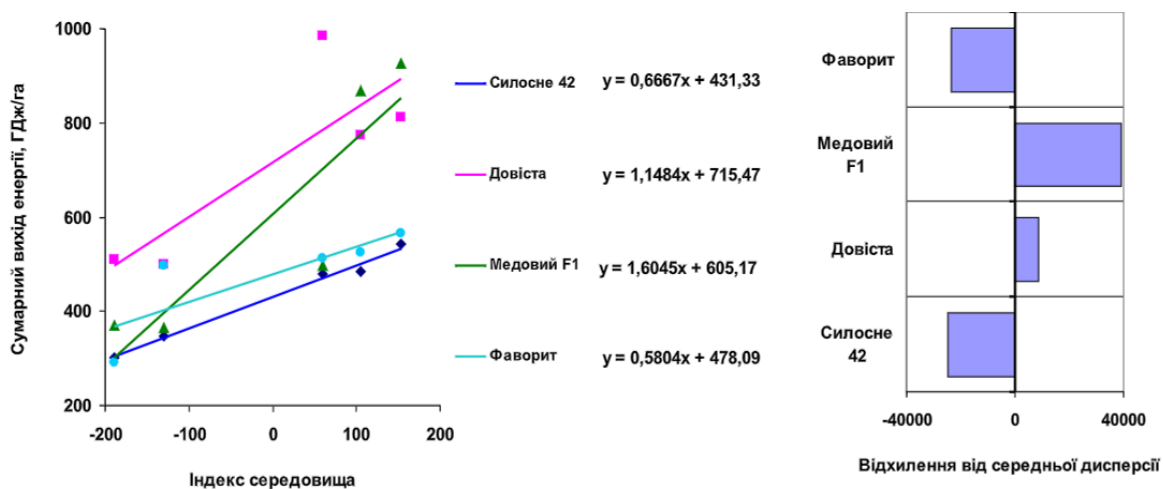


Рис. 3. Екологічна стабільність та пластичність сортів сорго цукрового за виходом енергії.

Отже, у зоні нестійкого зволоження центральної частини Лісостепу України найбільший середній за 2016–2020 рр. вихід біопалива та енергії отримано з біомаси цукрового сорго гібрида Довіста (до 791,8 ГДж/га), однак найбільш екологічно пластичним за показником загального виходу енергії з одиниці площі виявився гібрид Медовий F1 ( $b=1,62$ ), що свідчить про перспективність вирощування цього гібрида за умови сприятливих погодних умов та належного рівня агротехніки.

**Висновки.** Отже, в зоні нестійкого зволоження центральної частини Лісостепу України найбільший середній за 2016–2020 рр. вихід біопалива та енергії (до 791,8 ГДж/га) отримано з сорго цукрового середньопізнього гібрида Довіста за умови збирання його біомаси у фазу повної стиглості насіння (початок жовтня).

Збирання біомаси сорго цукрового на біогаз доцільно розпочинати не раніше фази викидання волоті. Для забезпечення максимального виходу біоетанолу оптимальними строками збирання зеленої біомаси сорго цукрового є II декада вересня – I декада жовтня, а максимальний вихід твердого біопалива досягається за збирання біомаси не раніше фази воскової стиглості зерна.

На формування врожаю зеленої біомаси сорго цукрового найбільше впливали погодні умови (47,4 %), меншим був вплив сортових особливостей (17,8 %) та строків збирання (12,8 %), а на вихід енергії найбільший вплив чинили строки збирання біомаси (37,4 %).

Виявлено тісну лінійну кореляційну залежність виходу енергії від врожайності зеленої ( $R^2=0,81$ ) та сухої біомаси ( $R^2=0,99$ ).

Найбільш екологічно пластичним за показником загального виходу енергії з одиниці площі виявився гібрид Медовий F1 ( $b=1,62$ ), що свідчить про перспективність вирощування цього гібрида за сприятливих погодних умов та належного рівня агротехніки.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Almodares A., Hadi M.R. Production of bioethanol from sweet sorghum: A review. *African Journal of Agricultural Research*. 2009. Vol. 4, Issue 9. P. 772–780.
2. Ethanol Production from Sweet Sorghum Syrup for Utilization as Automotive Fuel in India / Prasad S. et al. *Energy Fuels*. 2007. Vol. 21, Issue 4. P. 2415–2420. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef060328z>
3. Combined cultivar and harvest time to enhance biomass and methane yield in sorghum under warm dry conditions in Pakistan / Hassan M.U. et al. *Industrial Crops and Products*. 2019. Vol. 132. P. 84–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.02.019>
4. Cultivar and seeding time role in sorghum to optimize biomass and methane yield under warm dry climate / Hassan M.U. et al. *Industrial Crops and Products*. 2020. Vol.

145, Article ID 111983. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111983>

5. Sweet sorghum – a potential alternate raw material for bioethanol and bioenergy / Reddy B.V. et al. *International Sorghum and Millets Newsletter*. 2005. Vol. 46. P. 79–86.

6. Soltani A., Almodares A. Evaluation of the investments in sugar beet and sweet sorghum production. *National Convention of Sugar Production from Agriculture Products*. 13–16 March 1994. Shahid Chamran University. Ahwaz, Iran.

7. Effect of Time of Planting on Cane Yield and Quality Characters in Sweet Sorghum / Ratnavathi C. et al. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*. 2012. Vol. 2, Issue 1. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.4236/jsbs.2012.21001>

8. Byrt C.S., Grof C.P.L., Furbank R.T. C-4 Plants as Biofuel Feedstocks: Optimising Biomass Production and Feedstock Quality from a Lignocellulosic Perspective. *Journal of integrative plant biology*. 2011. Vol. 53, Issue 2, P. 120–135. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2010.01023.x>

9. Life-cycle energy use and greenhouse gas emissions of production of bioethanol from sorghum in the United States / Cai H. et al. *Biotechnology for biofuels*. 2013, Vol. 6, Article number: 141. DOI: <https://doi.org/10.1186/1754-6834-6-141>

10. Effects of planting date on sugar and ethanol yield of sweet sorghum grown in Arizona / Teetor V.H. et al. *Industrial Crops and Products*. 2011. Vol. 34, Issue 2. P. 1293–1300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.09.010>

11. Agronomic practices for production of ethanol from sweet sorghum / Lueschen W.E. et al. *Journal of production agriculture*. 1991. Vol. 4, Issue 4. P. 619–625. DOI: <https://doi.org/10.2134/jpa1991.0619>

12. Effect of Harvesting Time on Yield, Composition and Forage Quality of Some Forage Sorghum Cultivars / Atis I. et al. *International Journal of Agriculture and Biology*. 2012. Vol. 14, Issue 6. P. 879–886. DOI: <https://doi.org/10.1208/AWB/2012/14-6-879-886>

13. Effect of harvesting stage on sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L.) genotypes in Western Kenya / Oyier M.O. et al. *The Scientific World Journal*. 2017. Vol. 2017, Article ID: 8249532. 10 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/8249532>

14. Ганженко О.М. Вплив елементів технології вирощування на продуктивність та вихід біоетанолу з сорго цукрового у Центральному Лісостепу України. *Новітні агротехнології*. 2019. № 7. DOI: <https://doi.org/10.21498/na.7.2019.204794>

15. Герасименко Л.А. Вплив строків сівби та глибини загорання насіння на фотосинтетичну продуктивність посівів сорго цукрового (*Sorghum saccharatum* (L.) Pers.). Сортовивчення та охорона прав на сорти рослин. 2014. № 4. С. 73–77.

16. Вплив елементів технології вирощування на продуктивність сорго цукрового та забур'яненість посівів / Л.А. Правдива та ін. *Карантин і захист рослин*. 2018. № 8. С. 8–11.

17. Сторожик Л.І., Музика О.В. Ефективність вирощування сорго цукрового для переробки на біопаливо. *Таврійський Науковий Вісник*. 2019. Вип. 108. С. 91–100.

18. Методичні рекомендації з вирощування і перероблення цукрового сорго як сировини для виробництва різних видів біопалива в різних ґрунтово-кліматичних зонах України / О.М. Ганженко та ін. К.: Компрінт, 2020. 20 с.

19. Ермантраут Е.Р., Присяжнюк О.І., Шевченко І.Л. Статистичний аналіз агрономічних дослідних даних

у пакеті STATISTICA 6.0. Київ: ПоліграфКонсалтинг, 2007. 55 с.

20. Методика державної науково-технічної експертизи сортів рослин. Методи визначення показників якості продукції рослинництва / за ред. С.О. Ткачик. 4-те вид., випр. і доп. Вінниця: Нілан-ЛТД, 2015. 160 с.

#### REFERENCES

1. Almodares, A., Hadi, M.R. (2009). Production of bioethanol from sweet sorghum: A review. *African Journal of Agricultural Research*. Vol. 4, Issue 9, pp. 772–780.
2. Prasad, S., Singh, A., Jain, N., Joshi, H.C. (2007). Ethanol Production from Sweet Sorghum Syrup for Utilization as Automotive Fuel in India. *Energy Fuels*. Vol. 21, Issue 4, pp. 2415–2420. Available at: <https://doi.org/10.1021/ef060328z>
3. Hassan, M.U., Chattha, M.U., Barbanti, L., Chattha, M.B., Mahmood, A., Khan, I., Nawaz, M. (2019). Combined cultivar and harvest time to enhance biomass and methane yield in sorghum under warm dry conditions in Pakistan. *Industrial Crops and Products*. Vol. 132, pp. 84–91. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.02.019>
4. Hassan, M.U., Chattha, M.U., Barbanti, L., Mahmood, A., Chattha, M.B., Khan, I., Mirza, S., Aziz, S.A., Nawaz, M., Aamer, M. (2020). Cultivar and seeding time role in sorghum to optimize biomass and methane yield under warm dry climate. *Industrial Crops and Products*. Vol. 145, article ID 111983. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.11.1983>
5. Reddy, B.V., Ramesh, S., Reddy, P.S., Ramaiah, B., Salimath, M., Kachapur, R. (2005). Sweet sorghum – a potential alternate raw material for bioethanol and bioenergy. *International Sorghum and Millets Newsletter*. Vol. 46, pp. 79–86.
6. Soltani, A., Almodares, A. (1994). Evaluation of the investments in sugar beet and sweet sorghum production. National Convention of Sugar Production from Agriculture Products. 13–16 March 1994. Shahid Chamran University. Ahwaz, Iran.
7. Ratnavathi, C., Kumar, S., Kumar, B., Krishna, D., Patil, J. (2012). Effect of Time of Planting on Cane Yield and Quality Characters in Sweet Sorghum. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*. Vol. 2, Issue 1, pp. 1–9. Available at: <https://doi.org/10.4236/jsbs.2012.21001>
8. Byrt, C.S., Grof, C.P.L., Furbank, R.T. (2011). C-4 Plants as Biofuel Feedstocks: Optimising Biomass Production and Feedstock Quality from a Lignocellulosic Perspective. *Journal of integrative plant biology*. Vol. 53, Issue 2, pp. 120–135. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2010.01023.x>
9. Cai, H., Dunn, J.B., Wang, Z.C. (2013). Life-cycle energy use and greenhouse gas emissions of production of bioethanol from sorghum in the United States. *Biotechnology for biofuels*. Vol. 6, article number: 141. Available at: <https://doi.org/10.1186/1754-6834-6-141>
10. Teetor, V.H., Duclos, D.V., Wittenberg, E.T. (2011). Effects of planting date on sugar and ethanol yield of sweet sorghum grown in Arizona. *Industrial Crops and Products*. Vol. 34, Issue 2, pp. 1293–1300. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.09.010>
11. Lueschen, W.E., Putnam, D.H., Kanne, B.K., Hoverstad, T.R. (1991). Agronomic practices for production

of ethanol from sweet sorghum. *Journal of production agriculture*. Vol. 4, Issue 4, pp. 619–625. Available at: <https://doi.org/10.2134/jpa1991.0619>

12. Atis, I., Konuskan, O., Duru, M., Gozubenli, H., Yilmaz, S. (2012). Effect of Harvesting Time on Yield, Composition and Forage Quality of Some Forage Sorghum Cultivars. *International Journal of Agriculture and Biology*. Vol. 14, Issue 6, pp. 879–886. Available at: <https://doi.org/12-208/AWB/2012/14-6-879-886>

13. Oyier, M.O., Owuochi, J.O., Oyoo, M.E., Cheruiyot, E., Mulianga, B., Rono, J. (2017). Effect of harvesting stage on sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L.) genotypes in Western Kenya. *The Scientific World Journal*. Vol. 2017, article ID: 8249532, 10 p. Available at: <https://doi.org/10.1155/2017/8249532>

14. Hanzhenko, O.M. (2019). Vplyv elementiv tekhnolohii vyroshchuvannya na produktyvnist ta vykhid bioetanolu z sorho tsukrovoho u Tsentralnomu Lisostepu Ukrainy [Influence of elements of cultivation technology on productivity and yield of bioethanol from sugar sorghum in the Central Forest-Steppe of Ukraine]. *Novitni ahrotekhnolohii [The latest agricultural technologies]*, no. 7. Available at: <https://doi.org/10.21498/na.7.2019.204794>

15. Herasymenko, L.A. (2014). Vplyv strokiv sivby ta hlybyny zahortannia nasinnia na fotosyntetychnu produktyvnist posiviv sorho tsukrovoho (*Sorghum saccharatum* (L.) Pers.). [Influence of sowing dates and seed wrapping depth on photosynthetic productivity of sugar sorghum (*Sorghum saccharatum* (L.) Pers.) Crops.]. *Sortovyvchennia ta okhorona prav na sorty roslyn [Variety research and protection of plant variety rights]*, no. 4, pp. 73–77.

16. Pravdyva, L.A. (2018) Vplyv elementiv tekhnolohii vyroshchuvannya na produktyvnist sorho tsukrovoho ta zaburianenist posiviv [Influence of elements of cultivation technology on sugar sorghum productivity and weed infestation]. *Karantyn i zakhyst roslyn [Quarantine and plant protection]*, no. 8, pp. 8–11.

17. Storozhyk, L.I., Muzyka, O.V. (2019). Efektyvnist vyroshchuvannya sorho tsukrovoho dlia pererobky na biopalyvo [Efficiency of sugar sorghum cultivation for biofuel processing]. *Tavriiskyi Naukovyi Visnyk [Taurian Scientific Bulletin]*. Vol. 108, pp. 91–100. Available at: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2019.108.14>

18. Hanzhenko, O.M. (2020) Metodichni rekomendatsii z vyroshchuvannya i pererobliannya tsukrovoho sorho yak syrovyny dlia vyrobnytstva riznykh vydiv biopalyva v riznykh gruntovo-klimatychnykh zonakh Ukrainy [Methodical recommendations for growing and processing sugar sorghum as a raw material for the production of different types of biofuels in different soil and climatic zones of Ukraine], 20 p.

19. Ermantraut, E.R. Prysiashniuk, O.I. Shevchenko, I.L. (2007). Statystychnyi analiz ahronomichnykh doslidnykh danykh u paketi STATISTICA 6.0 [Statistical analysis of agronomic research data in the STATISTICA 6.0 package]. *Kyiv, PolihrafKonsalting*, 55 p.

20. Tkachyk, S.O. (2015) Metodyka derzhavnoi nauково-tekhnichnoi ekspertyzy sortiv roslyn [Methods of state scientific and technical examination of plant varieties]. *Metody vyznachennia pokaznykiv yakosti produktivnykh roslynnytstva [Methods for determining the quality of crop products]*. Vinnytsia, Nilan-LTD, 160 p.



### Энергетическая продуктивность сахарного сорго в зависимости от сроков уборки урожая в центральной части Лесостепи Украины

Ганженко А.Н.

В связи с глобальными изменениями климата сахарное сорго (*Sorghum saccharatum*) благодаря его быстрым темпам роста, раннему созреванию, эффективному использованию воды и ограниченной потребности в удобрениях является наиболее перспективным в мире растением для производства биотоплива.

В статье приведены результаты исследований по установлению зависимости показателей энергетической продуктивности сахарного сорго от сортовых особенностей (сорта Силосное 42 и Фаворит и гибриды Довиста и Медовый F1) и сроков уборки зеленой биомассы.

Цель исследований – установить влияние сортовых особенностей и сроков уборки урожая на энергетическую продуктивность сорго сахарного в зоне неустойчивого увлажнения центральной части Лесостепи Украины.

Предмет исследований – показатели энергетической продуктивности сахарного сорго (урожайность зеленой биомассы; сахаристость сока; выход биогаза, биоэтанола, твердого биотоплива; общий выход энергии).

Исследования проводили в течение 2016–2020 годов в зоне неустойчивого увлажнения центральной части Лесостепи Украины в условиях Белоцерковской опытно-селекционной станции Института биоэнергетических культур и сахарной свеклы НААН Украины.

Установлено, что наибольший выход биотоплива и энергии (до 791,8 ГДж/га) достигается при выращивании сахарного сорго гибрида Довиста при условии сбора его биомассы в фазу полной спелости семян (начало октября). К сбору биомассы сахарного сорго на биогаз целесообразно приступать не ранее фазы выбрасывания метелки. Для обеспечения максимального выхода биоэтанола оптимальными сроками уборки зеленой биомассы сахарного сорго является II декада сентября – I декада октября, а максимальный выход твердого биотоплива достигается при уборке биомассы не ранее фазы восковой спелости зерна. На формирование урожая зеленой биомассы сахарного сорго больше влияли погодные условия (47,4 %), меньше было влияние сортовых особенностей (17,8 %) и сроков уборки (12,8 %), а на выход энергии наибольшее влияние оказали сроки уборки биомассы (37,4 %). Установлено тесную линейную корреляционную зависимость выхода энергии от урожайности зеленой ( $R^2=0,81$ ) и сухой биомассы ( $R^2=0,99$ ). Наиболее экологически пластичным по показателю общего выхода энергии с единицы площади оказался гибрид Медовый F1 ( $b=1,62$ ), что свидетельствует о перспективности выращивания этого гибрида при благоприятных погодных условиях и надлежащем уровне агротехники.

**Ключевые слова:** сорго сахарное, сортовые особенности, сроки уборки, выход энергии, выход биотоплива, продуктивность.

### Energy productivity of sugar sorghum in the central part of the Forest-steppe of Ukraine depending on the harvesting time

Hanzhenko O.

Due to global climate change, sugar sorghum (*Sorghum saccharatum*), due to its fast growth rate, early maturation, efficient use of water and limited need for fertilizers, is the most promising plant for biofuel production in the world.

The article presents the results of the study on establishing the dependence of sugar sorghum energy performance indicators on varietal characteristics (varieties 'Silosne 42' and 'Favorit' and hybrids 'Dovista' and 'Medoviy F1') and the green biomass harvesting time.

The purpose of the research was to establish the influence of varietal characteristics and harvesting time on sugar sorghum energy productivity in the zone of unstable moisture in the Central part of the Forest-Steppe of Ukraine.

The research subject is sugar sorghum energy productivity indicators (yield of green biomass; sugar content of juice; yield of biogas, bioethanol, solid biofuel; total energy yield).

The studies were carried out during 2016–2020 in the zone of unstable moisture in the central part of the Forest-Steppe of Ukraine in the conditions of the Bila Tserkva Experimental Breeding Station of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet of the National Academy of Sciences of Ukraine.

It has been established that the highest yield of biofuel and energy (up to 791.8 GJ/ha) is achieved under growing sugar sorghum of the 'Dovista' hybrid, provided that its biomass is collected in the phase of full seed ripeness (early October). It is advisable to start collecting sugar sorghum biomass for biogas after the panicle throwing phase. To ensure the maximum yield of bioethanol, the optimal time for harvesting green biomass of sugar sorghum is the second decade of September – the first decade of October. The maximum yield of solid biofuel is achieved under harvesting biomass after the phase of waxy ripeness of grain. The formation of the yield of green biomass of sugar sorghum was more influenced by weather conditions (47.4 %), the influence of varietal characteristics (17.8 %) and the timing of harvesting (12.8 %) was less. But the energy yield was most influenced by the timing of harvesting biomass (37.4 %).

A close linear correlation between the energy output and the yield of green ( $R^2=0.81$ ) and dry biomass ( $R^2=0.99$ ) was established. The most ecological plasticity in terms of the total energy yield per unit area turned out to be the 'Medoviy F1' hybrid ( $b=1.62$ ), which indicates the prospects of growing this hybrid under favorable weather conditions and high level of agricultural technology.

**Key words:** sugar sorghum, varietal characteristics, harvesting time, energy yield, biofuel yield, productivity.



Copyright: Ганженко О.М. © This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

