

Продуктивність рослин сорго цукрового (*Sorghum saccharatum* L.) залежно від елементів технології вирощування на біопаливо в зоні недостатнього зволоження Лісостепу України

О. М. Ганженко

Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України, вул. Клінічна, 25, м. Київ, 03110, Україна, e-mail: ganzhenko74@gmail.com

Мета. Установити вплив строків збирання біомаси сорго цукрового різних сортів і гібридів на їхню продуктивність та вихід біопалива в зоні недостатнього зволоження Східного Лісостепу України. **Методи.** Біологічні (проведення польових досліджень упродовж 2017–2020 рр.) та статистичні (описова статистика, дисперсійний, кореляційний і регресійний аналізи). **Результати.** Найменшою врожайністю зеленої біомаси сорго цукрового була за збирання на початку серпня: сорти 'Силосне 42' та 'Фаворит' – 52,6 і 61,1 т/га, гібриди 'Медовий F₁' та 'Довіста' – 76,3 і 77,7 т/га відповідно. Перенесення строків збирання на середину вересня дало змогу підвищити врожайність сортів 'Фаворит' і 'Силосне 42' до 97,1 та 103,5 т/га, гібридів 'Довіста' і 'Медовий F₁' – до 146,6 та 132,9 т/га відповідно. За ще пізніших строків збирання збільшення врожайності зеленої біомаси спостерігалось лише в 'Довіста' (до 152,5 т/га). У фазі повної стиглості (ВВСН 92–98) рослини сорго цукрового накопичують максимальну кількість цукрів у соку. Найвищою цукристістю соку була в рослин гібрида 'Медовий F₁' – 17,5%, у решти досліджуваних культиварів вона змінювалася в межах від 14,8 до 15,5%. Найбільший вихід біопалива та енергії з одиниці площі досягався за вирощування сорго цукрового гібридів 'Медовий F₁' (до 792,0 ГДж/га) та 'Довіста' (до 815,8 ГДж/га). Попри високий рівень пластичності, суттєво поступався їм за цим показником сорт 'Фаворит' (до 547,2 ГДж/га). Сорт 'Силосне 42' мав найнижчий показник екологічної пластичності ($b = 0,79$), проте був найстабільнішим, що забезпечувало стабільний вихід енергії з одиниці площі. **Висновки.** У зоні недостатнього зволоження Східного Лісостепу України найвищі показники продуктивності та максимальний енергетичний потенціал забезпечують гібриди сорго цукрового 'Довіста' та 'Медовий F₁' за їх збирання не раніше фази повної стиглості.

Ключові слова: сортові особливості; строки збирання; продуктивність, вихід енергії; вихід біопалива; цукристість соку.

Вступ

Сорго цукрове (*Sorghum saccharatum* L.) – теплолюбна посухостійка культура, яка може використовуватися як сировина для виробництва різних видів біопалива в умовах недостатнього зволоження. Сорго цукровому притаманна вища толерантність до посухи порівняно із цукровою тростиною (*Saccharum officinarum* L.) та кукурудзою (*Zea mays* L.), які сьогодні широко використовуються для виробництва біопалива у світі [1–3].

Oleksandr Ganzhenko
<https://orcid.org/0000-0002-8118-1645>

Завдяки стійкості до посухи сорго цукрове може вирощуватися на енергетичні цілі в зоні недостатнього зволоження південно-східної частини України [4–6]. Водночас установлено [7], що в умовах нестійкого зволоження Східного Лісостепу України найбільше на врожайність сухої біомаси (69%) впливають сортові особливості сорго цукрового. Крім того, оптимальні строки та способи збирання біомаси культури залежать від сортових особливостей, погодних умов, а також від способів подальшого використання зібраної біомаси: для виробництва біогазу чи біоетанолу [8].

Дослідженнями, проведеними в умовах нестачі вологи у південно-західних штатах

США [9], встановлено, що найбільший вихід біопалива досягається за сівби насіння сорго цукрового у травні. Водночас величина впливу строків сівби насіння на енергетичну продуктивність культури залежала від її сортових особливостей. Також доведено, що ранні строки сівби забезпечують збільшення виходу біоетанолу на 13% порівняно з більш пізніми [10]. Збільшення періоду вегетації рослин сорго цукрового із 60 до 120 діб в умовах нестачі вологи (східна частина Пакистану) дає змогу підвищити врожайність сухої біомаси на 48%. При цьому подовження періоду вегетації рослин спричинювало підвищення концентрації легніно-целюлозної речовини в біомасі, що знижувало вихід біометану на 17% [1, 2]. Збирання сорго цукрового у пізніші строки сприяє збільшенню висоти рослин, урожаю зеленої і сухої біомаси та вмісту в ній лігніну. За збирання врожаю у фазі цвітіння й молочної стиглості зерен вміст сухої речовини не перевищує 24,7%, що унеможливорює подальше його силосування [11]. Строки збирання сорго цукрового в умовах дефіциту вологи є важливим чинником, що впливає на вміст цукру в стеблах і вихід біопалива. Тривалість періоду вегетації рослин культури 104–117 діб забезпечує максимальне накопичення цукру в стеблах, що сприяє високому виходу біоетанолу [12]. Дослідження, проведені в різних регіонах Індії [10], засвідчили, що найвищі показники врожайності зеленої біомаси, виходу соку та вмісту в ньому цукрів спостерігалися за пізніших строків сівби насіння сорго цукрового.

Водночас строки збирання біомаси суттєво впливали на технологічну якість соку сорго цукрового та ферментативну активність мікробіоти під час виробництва біоетанолу [13, 14]. Найвищу концентрацію цукрів у соку стебел сорго цукрового відзначено у фазі повної стиглості, проте найбільший вихід цукру з одиниці площі (9,4 т/га) – між фазами воскової та повної стиглості [15].

За використання сорго цукрового на енергетичні цілі важливо збільшити часовий проміжок між початком і закінченням збирання біомаси, оскільки це дасть змогу підвищити економічні показники ефективності перероблення біомаси на біоетанол чи біогаз [16].

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

Мета досліджень – встановити вплив строків збирання біомаси сорго цукрового різних сортів і гібридів на їхню продуктивність та вихід біопалива в зоні недостатнього зволоження Східного Лісостепу України.

Матеріали та методика досліджень

Дослідження проводили впродовж 2017–2020 рр. у зоні недостатнього зволоження Східного Лісостепу України в умовах Веселоподільської дослідно-селекційної станції (ВПДСС) Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН (49°38'Пн, 33°15'Зх).

Ґрунт дослідного поля – чорнозем типовий потужний, середньосуглинковий, малогумусний. Потужність гумусного горизонту – 35–45 см зі вмістом гумусу 3,6–4,2%. Уміст нітратного азоту – 22–24 мг/кг, рухомих форм фосфору – 26–29, калію – 114–150 мг/кг ґрунту. Реакція ґрунтового розчину орного шару слабколужна, ближча до нейтральної (рН 7,2–7,4).

Показники температури повітря та кількості опадів у роки досліджень мали незначні відхилення від середньобогаторічних даних. У 2017 р. температура повітря за вегетаційний період перевищувала середні багаторічні дані на 1,7 °С, у 2018-му – на 2,9; у 2019-му – на 1,9; у 2020 р. – на 1,4 °С.

У 2017 р. кількість опадів у середньому за вегетаційний період була меншою за середньобогаторічні показники на 113,5 мм. У розрізі місяців нестача вологи була такою: у квітні – 24,9 мм, у травні – 15,5; у червні – 33,1; у липні – 12,6; у серпні й вересні – 17,0 та 10,4 мм відповідно.

За вегетаційний період 2018 р. опадів випало менше за середньобогаторічні показники – у середньому на 65,7 мм. Відхилення за місяцями були незначні, проте у квітні й серпні кількість опадів була меншою на 16,1 і 46,3 мм.

У 2019 р. відзначено значні зміни кількості опадів у період вегетації переважно зі зменшенням середньобогаторічних показників (крім квітня й травня). Зокрема, у квітні кількість опадів була типовою для зони досліджень, у травні їх випало більше на 74,3 мм, а у червні, липні, серпні та вересні навпаки на 27,8; 53,8; 22,8 та 29,4 мм відповідно менше порівняно із середніми багаторічними показниками.

У квітні–вересні 2020 р. кількість опадів у період вегетації була меншою відповідно на 28,1; 9,3; 26,6; 29,6 та 17,7 мм порівняно із середніми багаторічними показниками. У травні вона перевищувала норму на 98,3 мм.

Дослідження проводили за схемою двофакторного дослідження. Площа посівної ділянки

становила 54 м², облікової – 28,8 м². Повторність досліду – чотириразова, загальна площа – 0,37 га.

Схема досліду:

Чинник А – строки збирання біомаси сорго цукрового:

– I строк – I декада серпня (фаза колосіння, ВВСН 52–58);

– II строк – III декада серпня (фаза цвітіння, ВВСН 62–68);

– III строк – II декада вересня (фаза воскової стиглості, ВВСН 82–88);

– IV строк – I декада жовтня (фаза повної стиглості, ВВСН 92–98).

Чинник Б – сорти й гібриди сорго цукрового: ‘Силосне 42’, ‘Довіста’, ‘Медовий’, ‘Фаворит’.

Сорт ‘Силосне 42’. Оригінатор – Інститут зернового господарства НААН. Занесений до Державного реєстру сортів рослин, придатних до поширення в Україні (далі – Держреєстр) із 2003 р. Рекомендована зона вирощування – Лісостеп. Середньостиглий.

Гібрид ‘Довіста’. Оригінатор – Інститут зернового господарства НААН. Занесений до Держреєстру з 2008 р. Рекомендована зона вирощування – Степ, Лісостеп. Середньопізній.

Гібрид ‘Медовий’. Оригінатор – Селекційно-генетичний інститут – Національний центр насіннезнавства та сортовивчення й Науково-виробнича асоціація «Одеська біотехнологія». Занесений до Держреєстру з 1998 р. Рекомендована зона вирощування – Лісостеп. Середньоранній.

Сорт ‘Фаворит’. Оригінатор – Селекційно-генетичний інститут – Національний центр насіннезнавства та сортовивчення. Занесений до Держреєстру з 2004 р. Рекомендована зона вирощування – Лісостеп. Середньостиглий.

Дослід закладали методом систематичних повторень: у кожному повторенні варіанти досліду розміщуються по ділянках послідовно. Насіння сорго цукрового висівали на початку травня на глибину 4–6 см із шириною міжрядь 45 см.

Обліки та спостереження за рослинами проводили відповідно до методики державної науково-технічної експертизи сортів рослин [17].

Вихід біопалива та енергії розраховували відповідно до методичних рекомендацій [8].

Отримані експериментальні дані обробляли статистично з використанням дисперсійного, кореляційного та регресійного аналізів [17, 18]. Екологічну пластичність та стабільність досліджуваних культиварів оцінювали за моделлю Ебергарт–Рассела [19].

Результати досліджень

Одним з найважливіших показників, що характеризують енергетичну продуктивність рослин сорго цукрового, є врожайність зеленої біомаси, оскільки саме від цього показника залежить вихід біогазу та біоетанолу з одиниці площі посівів цієї культури [1–5].

Установлено, що за першого строку збирання (фаза колосіння) врожайність зеленої біомаси в середньому за 2017–2020 рр. була найменшою і становила в гібридів ‘Довіста’ й ‘Медовий F₁’ 77,7 та 76,3 т/га, у сортів ‘Фаворит’ і ‘Силосне 42’ – 61,1 та 52,6 т/га відповідно (табл. 1). Зміщення строків збирання на кінець серпня (фаза цвітіння) дало змогу підвищити врожайність зеленої біомаси в середньому на 52,8%. Зокрема, врожайність гібридів ‘Довіста’ і ‘Медовий F₁’ зросла на 47,2 та 55,8%, а сортів ‘Фаворит’ та ‘Силосне 42’ – на 30,6 та 77,4% відповідно. За збирання зеленої біомаси в середині вересня (фаза воскової стиглості) приріст урожайності порівняно з попереднім строком збирання становив у середньому лише 18,1%. У більш пізній строк збирання (фаза повної стиглості) приріст урожайності зеленої біомаси спостерігався лише в середньопізнього гібрида ‘Довіста’ (152,5 т/га), тоді як в усіх інших досліджуваних культиварів сорго цукрового спостерігалася зменшення цього показника. Отже, найвища врожайність зеленої біомаси сорго цукрового в умовах недостатнього зволоження досягається між фазами цвітіння та воскової стиглості, що відповідає аналогічним дослідженням, проведеним у різних регіонах світу [1, 2, 9, 10].

Важливим показником, який впливає на вихід біоетанолу з одиниці площі сорго цукрового, є вміст цукрів у соку. Установлено, що до фази викидання волоті цукристість соку є невисокою і залежно від культивара змінюється в межах від 5,3 до 7,0% (див. табл. 1). У разі збирання біомаси наприкінці серпня концентрація вуглеводів у соку стебел збільшується приблизно вдвічі. У фазі воскової стиглості найвищий показник цукристості відзначено в гібрида ‘Медовий F₁’, у решти досліджуваних культиварів він був однаковим – 15,0%. За пізніших строків збирання (початок жовтня) в умовах недостатнього зволоження, де розташована Веселоподільська дослідно-селекційна станція, підвищення цукристості соку було несуттєвим. Отже, найвища концентрація цукрів у соку стебел сорго цукрового досягається між фазами воскової та повної стиглості. Аналогічні результати було отримано і в низці інших досліджень [13–15].

Таблиця 1

**Показники продуктивності сорго цукрового та виходу з нього біопалива
залежно від сортових особливостей і строків збирання біомаси (середнє за 2017–2020 рр.)**

Строки збирання	Сорт / гібрид	Урожайність зеленої біомаси, т/га	Суха речовина, %	Цукристість, %	Вихід біогазу, тис. м ³ /га	Вихід біоетанолу, т/га	Вихід твердого біопалива, т/га	Загальний вихід енергії, ГДж/га
I строк (I декада серпня)	'Силосне 42'	52,6	16,5	6,0	5,9	0,7	9,3	164,6
	'Довіста'	77,7	15,0	6,3	7,9	1,0	12,4	224,4
	'Медовий F ₁ '	76,3	17,6	7,0	9,2	1,1	14,5	258,6
	'Фаворит'	61,1	14,4	5,3	5,9	0,7	9,3	165,5
НІР _{0,05}		3,3	0,4	0,2	–	–	–	–
II строк (III декада серпня)	'Силосне 42'	93,3	20,1	11,8	12,8	2,4	20,1	379,9
	'Довіста'	114,4	20,0	12,8	16,2	3,2	25,4	486,1
	'Медовий F ₁ '	118,9	24,5	15,0	20,4	4,0	32,1	611,3
	'Фаворит'	79,8	20,6	10,5	11,4	1,9	17,9	331,8
НІР _{0,05}		6,1	0,9	0,7	–	–	–	–
III строк (II декада вересня)	'Силосне 42'	103,5	26,5	15,0	19,2	3,4	30,1	566,7
	'Довіста'	146,6	24,3	15,0	24,1	4,6	37,8	718,1
	'Медовий F ₁ '	132,9	26,3	16,5	24,4	4,9	38,3	732,5
	'Фаворит'	97,1	25,7	15,0	17,7	3,2	27,7	523,0
НІР _{0,05}		11,7	1,0	0,7	–	–	–	–
IV строк (I декада жовтня)	'Силосне 42'	93,6	29,3	14,8	19,2	3,1	30,2	559,6
	'Довіста'	152,5	26,1	15,5	27,4	5,1	43,1	815,8
	'Медовий F ₁ '	130,9	28,9	17,5	26,3	5,3	41,4	792,0
	'Фаворит'	93,8	28,4	15,3	18,6	3,2	29,3	547,2
НІР _{0,05}		13,1	1,1	0,9	–	–	–	–

Розрахунковий вихід біогазу з біомаси сорго цукрового, зібраної у фазі колосіння (початок серпня), є досить незначним і змінюється в межах від 5,9 ('Силосне 42' і 'Фаворит') до 9,2 тис. м³/га ('Медовий F₁') (див. табл. 1). З кожним наступним строком збирання вихід біогазу в усіх досліджуваних культуриварів зростає, що зумовлено підвищенням урожайності зеленої та сухої біомаси. Зокрема, за збирання біомаси наприкінці серпня вихід біогазу збільшується більш ніж удвічі. Зміщення строків збирання на середину вересня дає змогу збільшити цей показник у середньому в 1,4 раза. Максимальний вихід біогазу отримано за збирання сорго цукрового у фазі повної стиглості зерен: гібриди 'Довіста' та 'Медовий F₁' – 27,4 та 26,3 тис. м³/га, сорти 'Фаворит' та 'Силосне 42' – 18,6 та 19,2 тис. м³/га відповідно.

Результати досліджень свідчать, що збирання біомаси сорго цукрового на біоетанол у фазі колосіння не доцільне, оскільки внаслідок низького вмісту цукрів вихід біоетанолу становить у середньому 0,9 т/га (див. табл. 1). Починаючи з фази викидання волотей, спостерігається різке збільшення виходу біоетанолу (у 3,2 раза) з біомаси сорго цукрового. Подальше зміщення строків збирання на середину вересня (фаза воскової стиглості) дало змогу підвищити вихід біоетанолу порівняно з попереднім строком збирання в середньому на 40%. Перенесення строків

збирання ще на 20 діб (початок жовтня) сприяло збільшенню цього показника лише на 5%. Отже, для забезпечення максимального виходу біоетанолу з одиниці площі сорго цукрове слід починати збирати не раніше настання фази воскової стиглості.

Вихід твердого біопалива безпосередньо залежить від урожайності сухої речовини, тому, урахувавши низькі врожайності зеленої біомаси та вміст у ній сухої речовини на початкових фазах розвитку рослин сорго цукрового (до фази цвітіння), вихід твердого біопалива за раннього строку збирання біомаси не перевищував 14,5 т/га (див. табл. 1). За збирання біомаси наприкінці серпня вихід твердого біопалива становив у гібридів 'Довіста' та 'Медовий F₁' 25,4 і 32,1 т/га, у сортів 'Фаворит' та 'Силосне 42' – 17,9 і 20,1 т/га відповідно, тобто в середньому більш ніж удвічі перевищував показники за попереднього строку збирання. Подальше зміщення строків збирання на середину вересня дало змогу збільшити вихід твердого біопалива в середньому на 40,2%. Найбільшим цей показник очікувано був за четвертого строку збирання (початок жовтня), оскільки на цей час рослини перебували у фазі повної стиглості та сформували максимальну врожайність сухої біомаси.

Як інтегральний показник під час оцінювання енергетичної продуктивності досліджуваних сортів і гібридів сорго цукрового

використовували вихід енергії з одиниці площі посівів. Найбільший вихід енергії з біомаси сорго цукрового досягається в разі її перероблення на біоетанол та тверде біопаливо, загальний вихід енергії при цьому перевищує той, який можна отримати за перероблення біомаси на біогаз. Установлено, що за раннього збирання біомаси сорго цукрового (кінець липня – початок серпня) загальний вихід енергії, яку можна отримати з 1 га посівів, не перевищує 258,6 ГДж/га. Це пояснюється низькими врожайністю зеленої біомаси та вмістом сухої речовини, зокрема цукрів. Зміщення строків збирання на 20 діб (на кінець серпня) дає змогу підвищити вихід енергії у 2,2 рази. Завдяки збільшенню вмісту сухої речовини й вуглеводів у біомасі сорго цукрового у фазах воскової та повної стиглості вихід енергії за пізнього збирання також зростає. Зокрема, за збирання

біомаси в середині вересня загальний вихід енергії змінюється від 523,0 ('Фаворит') до 732,5 ГДж/га ('Медовий F₁'). Перенесення строків збирання ще на 20 діб (на початок жовтня) дає змогу збільшити загальний вихід енергії в середньому на 7%, але при цьому є ризик значного вилягання рослин, що ускладнює процес збирання й підвищує при цьому втрати біомаси.

За результатами дисперсійного аналізу встановлено, що на формування врожаю зеленої біомаси сорго цукрового найбільше впливали погодні умови, менше – строки збирання та сортові особливості. Проте на вихід енергії найбільше впливали строки збирання біомаси, а вплив погодних умов та сортових особливостей був меншим (рис. 1). Це пояснюється тим, що вихід енергії більше залежить від урожайності сухої біомаси, ніж зеленої.

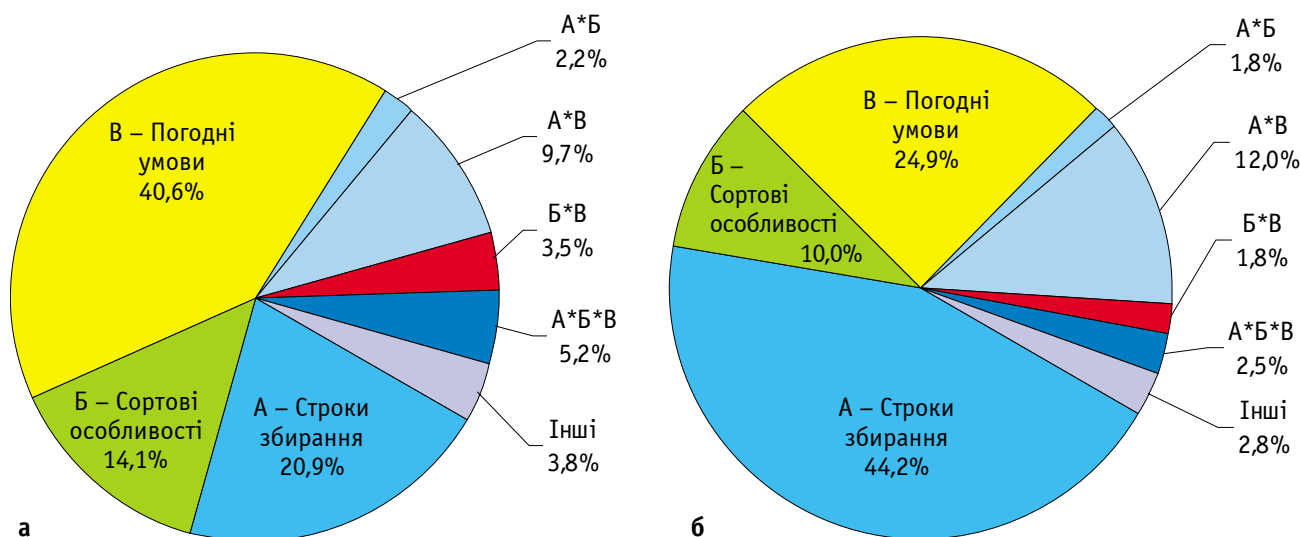


Рис. 1. Вплив досліджуваних чинників на продуктивність сорго цукрового: урожайність зеленої біомаси (а) і вихід енергії (б)

Результати кореляційного аналізу підтверджують тісну залежність між виходом енергії та врожайністю сухої біомаси, оскільки коефіцієнт кореляції $R = 0,924 \pm 0,049$ (рис. 2а), а між виходом енергії та врожайністю сухої біомаси – $R = 0,999 \pm 0,006$ (рис. 2б). Крім того, коефіцієнт рівняння регресійної залежності виходу енергії від урожайності зеленої біомаси менший порівняно з відповідним коефіцієнтом для сухої біомаси ($b_1 = 5,625 < b_2 = 21,044$).

Оскільки погодні умови в роки досліджень були досить строкатими, це дало змогу оцінити екологічну пластичність та стабільність досліджуваних сортів і гібридів сорго цукрового (табл. 2). Зокрема, за показником урожайності зеленої біомаси найпластичні-

шим був гібрид 'Довіста', у якого показник екологічної пластичності був найвищим ($b = 1,55$). Це свідчить, що він має високий потенціал продуктивності в зоні проведення досліджень, розкриття якого залежить від сприятливих погодних умов та правильної агротехніки. Найменш пластичним виявився сорт 'Силосне 42' ($b = 0,72$). Водночас він був найстабільнішим, оскільки відхилення від середньої дисперсії за показником урожайності зеленої біомаси було найменшим. Це свідчить про те, що сорт здатен формувати невисоку, проте стабільну врожайність зеленої біомаси незалежно від погодних умов та рівня агротехніки.

Результати досліджень екологічної пластичності за показником виходу енергії свід-

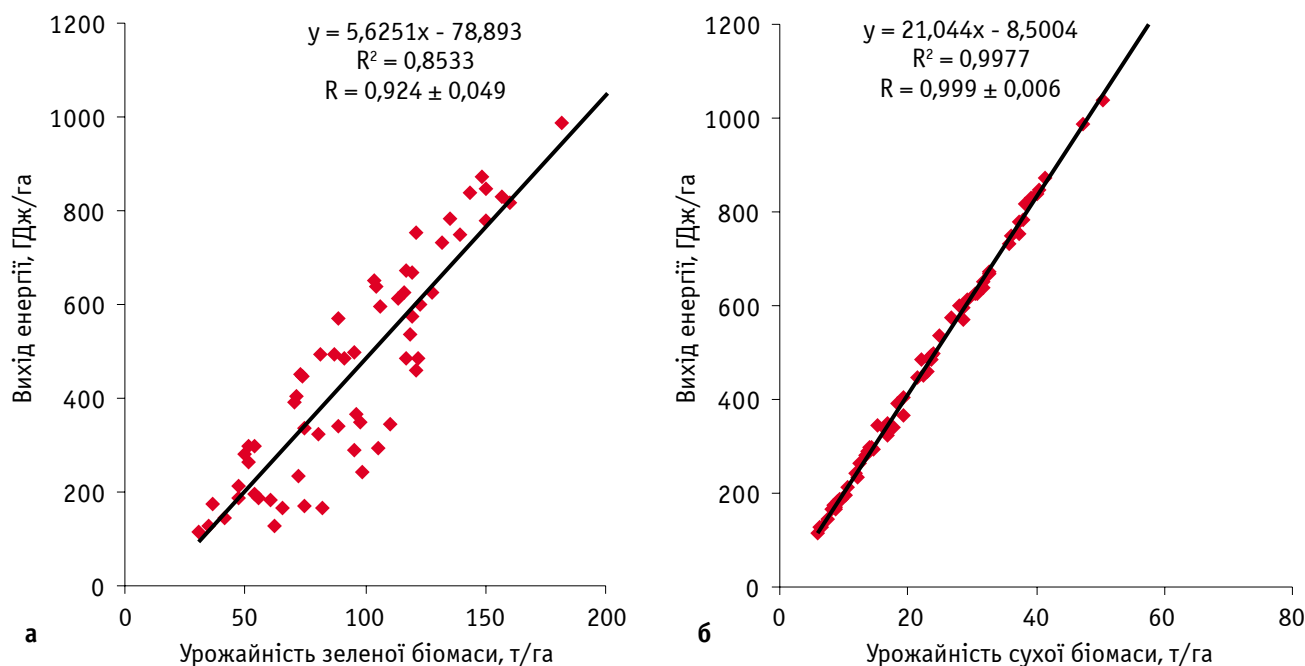


Рис. 2. Регресійна залежність виходу енергії від урожайності зеленої (а) та сухої (б) біомаси

чать, що найпластичнішими були 'Довіста' ($b = 1,25$) та 'Медовий F₁' ($b = 1,03$), які можна віднести до гібридів інтенсивного типу для зони недостатнього зволоження Східного Лісостепу України. Водночас гібрид 'Довіста' відзначався високим рівнем мінливості.

За рівнем пластичності щодо виходу енергії з одиниці площі сорт 'Силосне 42' ($b = 0,79$) значно поступався іншим досліджуваним культиварам, проте відхилення від середньої дисперсії для нього було найменшим, що свідчить про високий рівень стабільності.

Таблиця 2

Екологічна стабільність і пластичність сортів та гібридів сорго цукрового за врожайністю зеленої біомаси й виходом енергії

Сорт / гібрид	Урожайність зеленої біомаси		Сумарний вихід енергії	
	пластичність (b)	стабільність (W)	пластичність (b)	стабільність (W)
'Силосне 42'	0,72	$1,2 \times 10^3$	0,78	$3,5 \times 10^4$
'Довіста'	1,55	$5,2 \times 10^3$	1,25	$7,5 \times 10^4$
'Медовий F ₁ '	0,93	$1,8 \times 10^3$	1,03	$5,5 \times 10^4$
'Фаворит'	0,79	$1,3 \times 10^3$	0,93	$4,1 \times 10^4$

Висновки

Найбільша врожайність зеленої біомаси та вихід енергії в зоні недостатнього зволоження Східного Лісостепу України досягається за вирощування сорго цукрового гібридів 'Довіста' (152,5 т/га та 815,8 ГДж/га) і 'Медовий F₁' (132,9 т/га та 732,5 ГДж/га) за умови збирання біомаси у фазі повної стиглості. Попри високий рівень пластичності, сорт 'Фаворит' поступається досліджуваним гібридам як за врожайністю зеленої біомаси (до 97,1 т/га), так і за загальним виходом енергії (523,0 ГДж/га). Сорт 'Силосне 42' має найменший показник екологічної пластичності за виходом енергії ($b = 0,79$), проте він є найстабільнішим, що дає змогу отримувати сталий, хоч і невисокий вихід енергії

незалежно від погодних умов та рівня агротехніки.

Використана література

- Hassan M. U., Chattha M. U., Barbanti L. et al. Combined cultivar and harvest time to enhance biomass and methane yield in sorghum under warm dry conditions in Pakistan. *Ind. Crops Prod.* 2019. Vol. 132. P. 84–91. doi: 10.1016/j.indcrop.2019.02.019
- Hassan M. U., Chattha M. U., Barbanti L. et al. Cultivar and seeding time role in sorghum to optimize biomass and methane yield under warm dry climate. *Ind. Crops Prod.* 2020. Vol. 145. 111983. doi: 10.1016/j.indcrop.2019.111983
- Ratnavathi C., Kumar S., Kumar B. et al. Effect of Time of Planting on Cane Yield and Quality Characters in Sweet Sorghum. *J. Sustain. Bioenergy Syst.* 2012. Vol. 2, Iss. 1. P. 1–9. doi: 10.4236/jsbs.2012.21001
- Сторожик Л. І. Перспективи вирощування сорго цукрового, як альтернативного джерела енергії. *Цукрові буряки*. 2011. № 2. С. 20–21.
- Рудник-Іващенко О. І., Сторожик Л. І. Стан і перспективи соргових культур в Україні. *Вісник ЦНЗ АПВ Харків. обл.* 2011. Вип. 10. С. 198–206.

6. Грабовский Н. Б. Производительность сорго сахарного и выход биогаза в зависимости от гидротермических условий вегетационного периода. *Вестник Палесскага дзяржаўнага ўніверсітэта. Сэрыя прыродазнаўчых навук*. 2017. Вып. 2. С. 20–28.
7. Сторожик Л. І. Формування продуктивності сорго цукрового в умовах Східного Лісостепу України. *Наукові праці ІБКіЦБ*. 2018. Вип. 26. С. 91–103. doi: 10.47414/np.26.2018.211210
8. Ганженко О. М., Правдива Л. А., Фучило Я. Д. та ін. Методичні рекомендації з вирощування і перероблення цукрового сорго як сировини для виробництва різних видів біопалива в різних ґрунтово-кліматичних зонах України. Київ: Компринт, 2020. 20 с.
9. Teetor V. H., Duclos D. V., Wittenberg E. T. et al. Effects of planting date on sugar and ethanol yield of sweet sorghum grown in Arizona. *Ind. Crops Prod.* 2011. Vol. 34, Iss. 2. P. 1293–1300. doi: 10.1016/j.indcrop.2010.09.010
10. Lueschen W. E., Putnam D. H., Kanne B. K., Hoverstad T. R. Agronomic practices for production of ethanol from sweet sorghum. *J. Prod. Agric.* 1991. Vol. 4, Iss. 4. P. 619–625. doi: 10.2134/jpa1991.0619
11. Atis I., Konuskan O., Duru M. et al. Effect of Harvesting Time on Yield, Composition and Forage Quality of Some Forage Sorghum Cultivars. *Int. J. Agric. Biol.* 2012. Vol. 14, Iss. 6. P. 879–886.
12. Oyier M. O., Owuochi J. O., Oyoo M. E. et al. Effect of harvesting stage on sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L.) genotypes in Western Kenya. *Sci. World J.* 2017. Vol. 2017. 8249532. doi: 10.1155/2017/8249532
13. Ferreira O. E., da Silva A. F., Costa G. H. G. et al. Ethanolic Fermentation of Sweet Sorghum Broth: Effects of Genotypes, Harvest System and Enzymatic Treatment. *Sugar Tech.* 2021. Vol. 23, Iss. 3. P. 634–642. doi: 10.1007/s12355-020-00816-z
14. Nur A., Santoso S. B., Syahrudin K. et al. Study of interaction between genetic source, harvest time and storage time in some mutant varieties of sweet sorghum to support future bioindustry development. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 250. 012068. doi: 10.1088/1755-1315/250/1/012068
15. Teixeira T. P. M., Pimentel L. D., Dias L. A. D. et al. Redefinition of sweet sorghum harvest time: New approach for sampling and decision-making in field. *Ind. Crops Prod.* 2017. Vol. 109. P. 579–586. doi: 10.1016/j.indcrop.2017.09.002
16. Vlachos C. E., Pavli O. I., Fletmetakis E., Skaracis G. N. Exploiting pre- and post-harvest metabolism in sweet sorghum genotypes to promote sustainable bioenergy production. *Ind. Crops Prod.* 2020. Vol. 155. 112758. doi: 10.1016/j.indcrop.2020.112758
17. 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.
18. Ермантраут Е. Р., Присяжнюк О. І., Шевченко І. Л. Статистичний аналіз агрономічних дослідних даних в пакеті Statistica 6.0. Київ: ПоліграфКонсалтинг, 2007. 55 с.
19. Eberhart S. A., Russel W. A. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.* 1966. Vol. 6, No. 1. P. 36–40. doi: 10.2135/CROPSCI1966.0011183X000600010011X
- in Sweet Sorghum. *J. Sustain. Bioenergy Syst.*, 2(1), 1–9. doi: 10.4236/jsbs.2012.21001
4. Storozhyk, L. I. (2011). Prospects for growing sweet sorghum as an alternative energy source. *Tsukrovi buriaky* [Sugar Beet], 2, 20–21. [in Ukrainian]
5. Rudnyk-Ivashchenko, O. I., & Storozhyk, L. I. (2011). Status and prospects of sorghum crops in Ukraine. *Visnik Centru naukovogo zabezpečennâ APV Harkivs'koi oblasti* [Bulletin of the Center for Science Provision of Agribusiness in the Kharkiv region], 10, 198–206. [in Ukrainian]
6. Hrabovskyi, N. B. (2017). Productivity of sweet sorghum and biogas yield depending on the hydrothermal conditions of the growing season. *Vesnik Paleskaga dzârzhavnago universyteta. Seryâ pryrodaznaŭčyh navuk* [Bulletin of Palesky State University. Series Natural sciences], 2, 20–28. [in Russian]
7. Storozhyk, L. I. (2018). Formation of sugar sorghum productivity in the Eastern Forest-Steppe of Ukraine. *Naukovi praci Instytutu bioenergetičnih kultur ta cukrovih burâkiv* [Scientific Papers of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet], 26, 91–103. doi: 10.47414/np.26.2018.211210 [in Ukrainian]
8. Hanzhenko, O. M., Pravdyva, L. A., Fuchylo, Ya. D., Khivrych, O. B., Zykov, P. Yu., Humentyk, M. Ya., ... Yalanskyi, O. V. (2020). *Metodychni rekomendatsii z vyroshchuvannia i pererobliannia tsukrovoho sorho yak syrovyny dlia vyrobnytstva riznykh vydiv biopalyva v riznykh gruntovo-klimatychnykh zonakh Ukrainy* [Methodical recommendations for growing and processing sweet sorghum as a raw material for the production of different types of biofuels in different soil and climatic zones of Ukraine]. Kyiv: Komprint. [in Ukrainian]
9. Teetor, V. H., Duclos, D. V., Wittenberg, E. T., Young, K. M., Chawhuaymak, J., Riley, R. R., & Ray, T. (2011). Effects of planting date on sugar and ethanol yield of sweet sorghum grown in Arizona. *Ind. Crops Prod.*, 34(2), 1293–1300. doi: 10.1016/j.indcrop.2010.09.010
10. Lueschen, W. E., Putnam, D. H., Kanne, B. K., & Hoverstad, T. R. (1991). Agronomic practices for production of ethanol from sweet sorghum. *J. Prod. Agric.*, 4(4), 619–625. doi: 10.2134/jpa1991.0619
11. Atis, I., Konuskan, O., Duru, M., Gozubeni, H., & Yilmaz, S. (2012). Effect of Harvesting Time on Yield, Composition and Forage Quality of Some Forage Sorghum Cultivars. *Int. J. Agric. Biol.*, 14(6), 879–886.
12. 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. *Sci. World J.*, 2017, 8249532. doi: 10.1155/2017/8249532
13. Ferreira, O. E., da Silva, A. F., Costa, G. H. G., Roviero, J. P., & Mutton, M. J. R. (2020). Ethanolic Fermentation of Sweet Sorghum Broth: Effects of Genotypes, Harvest System and Enzymatic Treatment. *Sugar Tech*, 23(3), 634–642. doi: 10.1007/s12355-020-00816-z
14. Nur, A., Santoso, S. B., Syahrudin, K., Efendy, R., & Lestari, E. G. (2019). Study of interaction between genetic source, harvest time and storage time in some mutant varieties of sweet sorghum to support future bioindustry development. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*, 250, 012068. doi: 10.1088/1755-1315/250/1/012068
15. Teixeira, T. P. M., Pimentel, L. D., Dias, L. A. dos S., Parrilla, R. A. da C., da Paixão, M. Q., & Biesdorf, E. M. (2017). Redefinition of sweet sorghum harvest time: New approach for sampling and decision-making in field. *Ind. Crops Prod.*, 109, 579–586. doi: 10.1016/j.indcrop.2017.09.002
16. Vlachos, C. E., Pavli, O. I., Fletmetakis, E., & Skaracis, G. N. (2020). Exploiting pre- and post-harvest metabolism in sweet sorghum genotypes to promote sustainable bioenergy production. *Ind. Crops Prod.*, 155, 112758. doi: 10.1016/j.indcrop.2020.112758
17. Tkachyk, S. O. (Ed.). (2015). *Metodyka derzhavnoi naukovotekhnichnoi ekspertyzy sortiv roslyn. Metody vyznachennia pokaznykiv yakosti produktsii roslynnytstva* [Methodology

References

1. 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. *Ind. Crops Prod.*, 132, 84–91. doi: 10.1016/j.indcrop.2019.02.019
2. Hassan, M. U., Chattha, M. U., Barbanti, L., Mahmood, A., Chattha, M. B., Khan, I., ... Aamer, M. (2020). Cultivar and seeding time role in sorghum to optimize biomass and methane yield under warm dry climate. *Ind. Crops Prod.*, 145, 111983. doi: 10.1016/j.indcrop.2019.111983
3. Ratnavathi, C., Kumar, S., Kumar, B., Krishna, D., & Patil, J. (2012). Effect of Time of Planting on Cane Yield and Quality Characters

- of state scientific and technical examination of plant varieties. Methods of determining the quality indices of crop production]. (4th ed., rev. and enl.). Vinnytsia: Nilan-LTD. [in Ukrainian]
18. Ermantraut, E. R., Prysiazhniuk, O. I., & Shevchenko, I. L. (2007). *Statystychnyi analiz ahronomichnykh doslidnykh danykh v paketi Statistica 6.0* [Statistical analysis of agronomic study data in the Statistica 6.0 software suite]. Kyiv: PolihrafKonsaltnyh. [in Ukrainian]
19. Eberhart, S. A., & Russel, W. A. (1966). Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.*, 6(1), 36–40. doi: 10.2135/CROPSCI1966.0011183X000600010011X

UDC 633.62: 620.952

Hanzhenko, O. M. (2021). Productivity of sweet sorghum (*Sorghum saccharatum* L.) depending on the elements of plant cultivation technology for biofuel in the zone of insufficient moisture in the Forest-Steppe of Ukraine. *Plant Varieties Studying and Protection*, 17(3), 240–247. <https://doi.org/10.21498/2518-1017.17.3.2021.242978>

Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet, NAAS of Ukraine, 25 Klinichna St., Kyiv, 03110, Ukraine, e-mail: ganzhenko74@gmail.com

Purpose. To reveal the influence of harvest timing of biomass of sweet sorghum various varieties and hybrids on their productivity and biofuel yield in the zone of insufficient moisture in the Eastern Forest-Steppe of Ukraine.

Methods. Biological (conducting field research during 2017–2020) and statistical (descriptive statistics, analysis of variance, correlation and regression analyzes).

Results. The lowest yield of sweet sorghum green biomass was during harvesting in early August. In ‘Sylosne 42’ and ‘Favoryt’ varieties it was 52.6 and 61.1 t/ha, in ‘Medovyi F₁’ and ‘Dovista’ hybrids – 76.3 and 77.7 t/ha, respectively. The postponement of harvesting to mid-September allows increasing the yield of varieties ‘Favoryt’ and ‘Sylosne 42’ to 97.1 and 103.5 t/ha, ‘Dovista’ and ‘Medovyi F₁’ hybrids up to 146.6 and 132.9 t/ha, respectively. With even later harvesting periods, an increase in the yield of green biomass was observed only in ‘Dovista’ (up to 152.5 t/ha). In the full ripening phase (BBCH 92–98), sugar sorghum plants accumulate the maxi-

mum amount of sugars in the sap. The highest cap sugar content was in plants of ‘Medovyi F₁’ hybrid – 17.5%, in the other studied cultivars it varied from 14.8 to 15.5%. The highest yield of biofuel and energy per unit area was achieved with growing ‘Dovista’ (up to 815.8 GJ/ha) and ‘Medovyi F₁’ (up to 792.0 GJ/ha) hybrids. Despite the high level of plasticity, ‘Favoryt’ variety is inferior in total energy yield (up to 547.2 GJ/ha). ‘Sylosne 42’ has the lowest plasticity index ($b = 0.79$); however, it is the most stable variety, which allows to obtain a stable, though not high, energy yield (up to 559.6 GJ/ha). **Conclusions.** In the zone of insufficient moisture in the Eastern Forest-Steppe of Ukraine, the highest productivity indicators and the maximum energy potential can be provided by the hybrids of sweet sorghum ‘Dovista’ and ‘Medovyi F₁’ for their harvesting not earlier than the phase of full maturity.

Keywords: *varietal characteristics; harvesting date; productivity; energy yield; biofuel yield; sugar content of juice.*

Надійшла / Received 08.06.2021
Погоджено до друку / Accepted 22.07.2021