



## Original researches

## Sweet Sorghum Raw Material Production on Reclaimed Lands

 M. M. Kharytonov<sup>1</sup>, M. G. Babenko<sup>1</sup>, V. I. Kozechko<sup>1</sup>,  
 O. O. Mytsyk<sup>1</sup>, N. V. Martynova<sup>2</sup>, V. L. Hamandii<sup>3</sup>
<sup>1</sup>Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

<sup>2</sup>Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

<sup>3</sup>Breeding-genetic Institute, National Center of Seed Management and Varieties Testing NAASU, Odesa, Ukraine

Received: 22 March 2021

Revised: 30 March 2021

Accepted: 31 March 2021

 Dnipro State Agrarian and Economic  
 University, Serhii Efremov Str., 25, Dnipro,  
 49000, Ukraine

 Oles Honchar Dnipro National University,  
 Gagarina av., 72, Dnipro, 49000, Ukraine

 Breeding-genetic Institute, National Center  
 of Seed Management and Varieties Testing  
 NAASU, Ovydyopol road, 3, Odesa, 65000,  
 Ukraine

Tel.: +38-097-345-62-27

 E-mail: kharytonov.m.m@dsau.dp.ua  
 nadiamart.bg@gmail.com  
 sgi-sorghum@ukr.net

 Cite this article: Kharytonov, M. M.,  
 Babenko, M. G., Kozechko, V. I.,  
 Martynova, N. V., & Hamandii, V. L. (2021).  
 Sweet sorghum raw material production on  
 reclaimed lands. *Agrology*, 4(2), 77–84.  
 doi: 10.32819/021010

**Abstract.** Bioenergetic characteristics of quantitative and qualitative properties of sweet sorghum hybrids are provided on the basis of a comprehensive study under conditions of cultivation on reclaimed lands. The results of studying the growth and yield characteristics of hybrids of domestic and American selection during four years from 2016 to 2019 under the conditions of the Pokrov educational and scientific station of land reclamation DSAEU are presented. The height of the crop stands varied from 235.3 to 300.0 cm when growing sweet sorghum on various substrates of mining formations. The lowest yield of green biomass was observed mainly on gray-green clay (38.1 t/ha), and the highest – on loess-like loam (101.0 t/ha). Fertilizing with nitrogen fertilizer and biohumate by fertigation helped to strengthen vertical growth, increase the yield of green biomass and sweet sorghum grains. The greatest effect was obtained for American hybrids. For Ukrainian hybrids, the application of nitrogen fertilizers had a positive effect on black soil and loess-like loam while the effect of biohumate was noticed only on loess-like loam. Long-term research of the sweet sorghum hybrids allowed us to evaluate the studied objects by the level of possible production of green biomass and theoretical bioethanol. Ukrainian hybrids Medove and Zubr using allow to produce on marginal lands from 3600 to 4250 l/ha of ethanol. The potential of American hybrids SS506 and Mohawk is slightly lower – 3150–3400 l/ha. Fertigation with nitrogen fertilizer increases the yield of theoretical ethanol from 27% to 68%, irrigation and addition of biohumate – from 15% to 36%.

**Keywords:** sweet sorghum hybrid; the height; yields; bioethanol.

## Виробництво сировинного матеріалу цукрового сорго на рекультивованих землях

 M. M. Харитонов<sup>1</sup>, М. Г. Бабенко<sup>1</sup>, В. І. Козечко<sup>1</sup>, О. О. Мицик<sup>1</sup>, Н. В. Мартинова<sup>2</sup>, В. Л. Гамандій<sup>3</sup>
<sup>1</sup>Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна

<sup>2</sup>Дніпровський національний університет імені Олеса Гончара, м. Дніпро, Україна

<sup>3</sup>Селекційно-генетичний інститут Національний центр насіннізнавства та сортотвчення, м. Одеса, Україна

**Анотація.** На основі глибокого дослідження кількісних і якісних властивостей гібридів цукрового сорго надано їх біоенергетичну характеристику в умовах вирощування культури на рекультивованих землях Покровської навчально-дослідної станції рекультивативної земель ДДАЕУ. Узагальнено результати вивчення особливостей росту та врожайності гібридів вітчизняної та американської селекції протягом 2016–2019 років. У період вирощування цукрового сорго на різних гірничих субстратах висота травостою варіювала від 235,3 см до 300,0 см. Найнижчий рівень урожайності зеленої біомаси отримано переважно на сіро-зеленій глинні (38,1 т/га), а найвищий – на лесоподібному суглинку (101,0 т/га). Підживлення азотним добривом та біогуматом методом фертигації сприяло посиленню вертикального росту, підвищенню врожайності зеленої біомаси та зерна цукрового сорго. Найбільший ефект зареєстровано для американських гібридів. Для українських рослин внесення азотних добрив мало позитивний ефект на чорноземі та лесоподібному суглинку, тоді як дія біогумату проявилася лише на лесоподібному суглинку. Багаторічне вивчення гібридів цукрового сорго дозволило оцінити досліджувані об'єкти за рівнем можливого отримання зеленої біомаси та теоретичного біоетанолу. На малопродуктивних ґрунтах з українських гібридів Медове та Зубр можна виробити від 3600 до 4250 л/га етанолу. Потенціал американських гібридів SS506 та Mohawk дещо нижчий – 3150–3400 л/га. Фертигація азотним добривом сприяє підвищенню виходу теоретичного етанолу від 27% до 68%, зрошення та додавання біогумату – від 15% до 36%.

**Ключові слова:** цукрове сорго; гібрид; висота; урожайність; біоетанол.

## Вступ

Цукрове сорго – це перспективна, посухостійка рослина, яка відзначається низкою корисних властивостей і великим потенціалом для використання в різних сферах господарювання

в Україні (Mostenska et al., 2013; Rakhmetov et al., 2018). Сік зі свіжого стебла може бути використаний для виробництва цукру, сиропу і біоетанолу першого покоління (Sipos et al., 2009; Kim et al., 2011). Віджата зелена маса цукрового сорго (мезга або багаса) використовується на фураж або для виробництва

біогазу, твердого біопалива (паливно-енергетичних брикетів, пелет тощо) біоетанолу другого покоління, добрив, картону та паперу (Betancur et al., 2010). Стебла сорго містять легкодоступні розчинні вуглеводи. Отже, відповідає потреба у ферментативному перетворенні крохмалю в цукор. Це дає економічні переваги сорго перед іншими культурами, що містять крохмаль. Високий вміст цукру і легкість екстрагування перетворюють цукрове сорго в одну з провідних сировинних культур для виробництва біопалива (Taylor et al., 2006). Короткий життєвий цикл (близько 4 місяців), процес фотосинтезу типу  $C_4$ , який сприяє більш високій ефективності використання води і поживних речовин, невибагливість і низька вартість вирощування, особливо корисні для прийняття біомаси цукрового сорго як сировини (Reddy et al., 2005; Regassa et al., 2014). Ураховуючи специфіку маргінальних земель, відбір енергетичних генотипів сорго повинен ґрунтуватися на певних критеріях: швидка і однорідна схожість; здатність давати стабільно високий вихід біомаси; високий вміст цукру в стебловому соці; стійкість до хвороб (Adeyanju et al., 2015).

Однак питання визначення найбільш продуктивних гібридів для умов земель, рекультивованих після видобутку корисних копалин, вивчено ще недостатньо. Ось чому тематика досліджень у цьому напрямку й донині залишається актуальною. Використання різних видів залишків біомаси є важливою складовою майбутньої концепції біоенергетики (Curovic et al., 2016). Тому метою досліджень стало надати біоенергетичну оцінку виробництву біопаливної сировини на рекультивованих землях з основи використання біомаси цукрового сорго.

## Матеріал та методи

Дослідження проводили в умовах Північної підзони Степу України в Нікопольському районі Дніпропетровської області на Покровській навчально-дослідній станції рекультивації земель Дніпровського державного аграрно-економічного університету з 2016 по 2019 рік. Був закладений двофакторний польовий дослід. Фактор А – гібриди цукрового сорго вітчизняного та американського походження; фактор В – різні типи гірничих субстратів. У 2019 році до попередніх двох факторів був доданий третій (фактор С) – додаткове зрошення, фертигація рослин мінеральним азотним добривом та біогуматом. У 2016 році – біотестування родючості насипного шару чорнозему (НШЧ) та трьох фітомеліорованих гірничих порід: лесоподібний суглинок (ЛС), червоно-бура й сіро-зелена глини (ЧБГ та СЗГ), вирощування двох українських гібридів (Медове і Зубр). Після визначення лесоподібного суглинка найкращим з трьох гірничих порід субстратом до переліку гібридів у польових дослідках 2017–2018 рр. додали два американських гібриди (SS506 та Mohawk). Другим субстратом для порівняння слугував на-

сипний шар чорнозему. У 2019 році схема дослідів 2017–2018 років була ускладнена задля визначення ефективності додаткових методів культивування цукрового сорго (зрошення, фертигація азотним добривом та біогуматом) з метою виявлення найбільш оптимальної технології для підвищення врожайності на малопродуктивних землях. Рослини в контролі вирощували в богарних умовах. Крапельна технологія зрошення була використана в інших трьох варіантах. Застосовували диференційний підхід підтримання вологості ґрунту на рівні 70% НР до фази кушіння, 80% НР у період трубкування та 75% у фазі викидання волоті. Фертигацію азотним добривом та біогуматом робили двічі: у фазах 5–6 листків та викидання волоті. Доза азотного добрива (аміачна селітра д.р.) становила 60 кг/га, а біогумату – 100 мл / 10 л води.

Погодні умови за роки досліджень характеризувалися підвищеною середньомісячною температурою повітря на 1–2 °С порівняно зі середньобаторічними даними. У 2016–2017 рр. температура в травні майже відповідала середньобаторічній, а в 2018–2019 рр. була вище на 1,9–2,8 °С (рис. 1).

Червень також характеризувався підвищеною температурою повітря (на 1,8–2,1 °С у 2016–2018 рр. та на 4,1 °С у 2019 р.). Температура липня за всі роки досліджень значно не відрізнялася від багаторічних даних. У цей самий час серпень та вересень були спекотнішими на 2,1–3,7 °С. Степова зона України характеризується досить посушливими умовами. Середньорічна кількість опадів звичайно не перевищує 550–560 мм. 2016–2018 р. виявилися ще більш посушливими: кількість опадів протягом вегетаційного сезону була нижче кліматичної норми на 25–41%. Навпроти, 2019 рік виявився аномально вологим, кількість опадів перевищувала кліматичну норму вдвічі (рис. 2).

Опади мали переважно зливовий характер, та найбільша їх кількість припадала на травень і червень. Значення кислотності досліджуваних техноземів варіюють від 7,3 до 7,9. У фітомеліорованих гірничих породах вміст гумусу становить близько 1,1%, а в чорноземі – 3,3%. Вміст азоту в гірничих породах після 20-річної фітомеліорації підвищився у 5–6 разів і сягав 60–70% від показника насипного шару чорнозему. Зростання рівня загального фосфору в техноземах підвищилося на 28–68% (Kharytonov, Gonchar et al., 2020). Найбільша кількість водорозчинних і крихкозв'язаних фосфатів кальцію знаходилася в чорноземі південному. Вміст доступних форм фосфору в гірничих породах у 2–5 разів менше. Того часу в субстратах гірничих порід більш виражена відсоткова частка ближнього резерву фосфатів. Отже, розраховувати на перехід фосфорних сполук із крихкозв'язаної до легкодоступної форми можна завдяки процесам вивітрювання гірничих порід і, зокрема, дії біологічного фактора: фітомеліорація, внесення фосформобілизуючих біопрепаратів тощо. Калій за його вмістом не обмежує

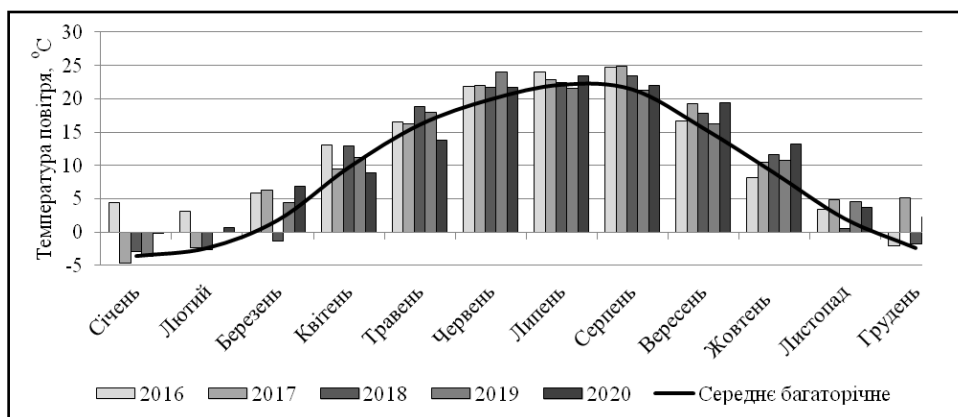


Рис. 1. Температура повітря за роки дослідження

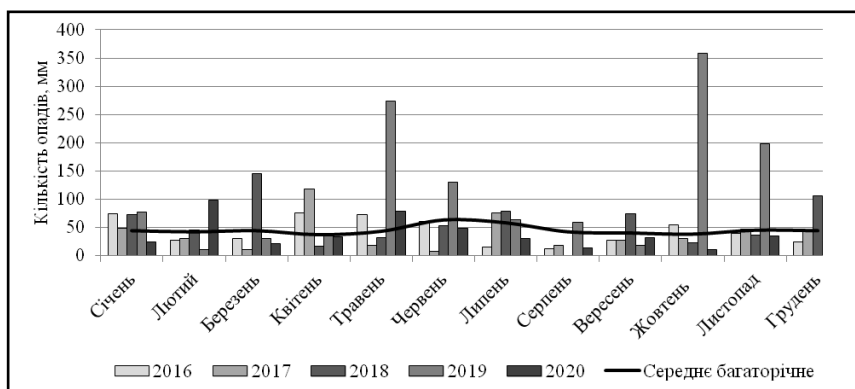


Рис. 2. Кількість опадів за роки дослідження

ріст рослин. Було визначено, що за вмістом мікроелементів усі три гірничі субстрати дещо поступаються показникам чорноземної маси (Kharytonov, Martynova et al., 2020). Тобто за таких умов є можливість вирощування цукрового сорго на фітомеліорованих гірничих породах Нікопольського марганцеворудного родовища в декількох напрямках: переробка на біоетанол, соргомед, пеллети з мезги тощо (Mathur et al., 2017). Насіння сорго висівали в першу декаду травня. Густота посіву насіння становила 130 тис. насінин на 1 га. Досліджено біометричні показники, продуктивність, вихід цукру та теоретичний вихід етанолу. Висоту рослин вимірювали лінійкою. Для визначення врожаю надземної біомаси рослини у фазі молочно-воскової стиглості зрізали на висоті 10 см від рівня ґрунту та зважували. Після цього біомасу сушили до постійної ваги, а потім знову зважували. Врожай зерна визначали ваговим методом у фазі повної стиглості. Концентрацію цукру в стеблах цукрового сорго вимірювали в одиницях Брікс, які являють собою відсоток розчинних цукрів. Один градус Брікс дорівнює 1 г цукру на 100 г соку. Вміст цукру визначали за допомогою ручного рефрактометра “РНВО–50АТС”. Консервативну врожайність цукру (т/га) розраховували на основі підходу, який передбачає, що концентрація цукру становить 75% Брікс, вираженого (г/кг) цукрового соку (Ekefre et al., 2017). У роботі використано рівняння:  $KBC = (B3M - B3C) \cdot 0,75$ , де КВЦ є консервативний вихід цукру, т/га; ВЗМ – врожайність зеленої маси стебел, т/га, ВЗСМ – врожайність сухої маси стебел, т/га.

Теоретичний вихід етанолу розраховували як вихід цукру, помножений на коефіцієнт перерахунку (0,58 л етанолу на 1 кг цукру):  $TBE = KBC \cdot 0,58$ , де ТВЕ – теоретичний вихід етанолу, л/га; КВЦ – консервативний вихід цукру, кг/га. Отримані результати оброблені методом диференціального аналізу зі застосуванням комп’ютерного пакету програм “MATOBRAB”.

## Результати

У 2016 році досліджено біометричні характеристики українських гібридів сорго на трьох фітомеліорованих гірничих породах – на лесоподібному суглинку, червоно-бурій глині, сіро-зеленій глині та на насипному шарі чорнозему (рис. 3, 4).

Найбільшою висотою відрізнялися рослини, вирощені на лесоподібному суглинку (295–300 см), а найменшою – на сіро-зеленій глині (235–270 см).

Гібрид сорго Зубр виявився більш продуктивним, ніж Медове. Найнижчою врожайністю зеленої біомаси характеризувався гібрид Медове на сіро-зеленій глині (38,05 т/га), гібрид Зубр – на червоно-бурій глині (72,75 т/га). Найвища врожайність для обох культиварів зафіксована на лесоподібному суглинку: 82,5 т/га (Медове) та 100,0 т/га (Зубр). Таким чином, фітомеліорований лесоподібний суглинок виявився найбільш придатним субстратом для вирощування

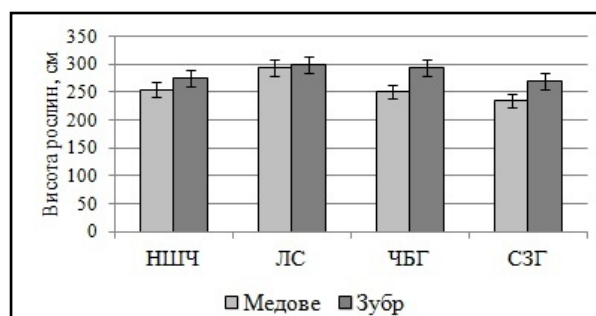


Рис. 3. Висота цукрового сорго, вирощеного на різних гірничих субстратах, см

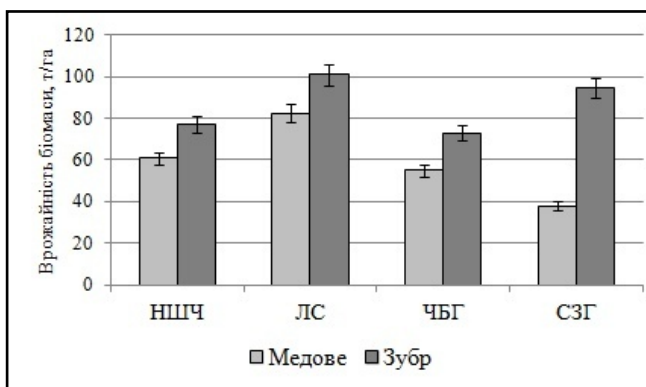
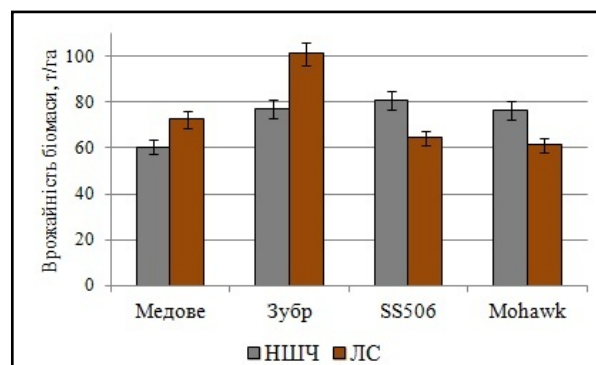


Рис. 4. Врожайність зеленої біомаси цукрового сорго на різних гірничих субстратах, т/га



2017 рік  $HIP_{0,95}$  A-1,88 B-1,33 AB-2,66  
2018 рік  $HIP_{0,95}$  A-1,38 B-1,95 AB-2,76

Рис. 5. Середня врожайність зеленої біомаси цукрового сорго на різних гірничих субстратах у 2017–2018 рр., т/га

цукрового сорго.

У 2017–2018 рр., при вирощуванні цукрового сорго на різних фітомеліорованих гірничих субстратах, висота травою українських гібридів варювала між 255–300 см, а американських – між 220–317 см. На лесоподібному суглинку найбільш високими були рослини вітчизняного походження; американські гібриди, навпаки, краще зростали на насипному шарі чорнозему. Серед досліджених гібридів на насипному шарі чорнозему врожайність зеленої маси була найбільша в гібрида SS506, а найменша в гібрида Медове. На лесоподібному суглинку найвищий рівень продуктивності виявлено для гібрида Зубр, а найнижчий для гібрида Mohawk (рис. 5).

Виявлено, що висота рослин гібрида Зубр була трохи вище, ніж у попередні роки (300–310 см), а гібрида SS506, навпаки, нижче (220–221 см). Залежно від типу субстрату та різних варіантів фертигації спостерігалися відмінності в ростових показниках та врожайності досліджених гібридів цукрового сорго. Відмічено, що рослини гібрида Медове на лесоподібному суглинку були вищі, ніж на чорноземі в усіх варіантах досліду. В інших сортів висота рослин у варіантах без зрошення та додавання добрив (контроль) була майже однаковою на обох субстратах. На чорноземі зрошення без додавання добрив привело до підвищення цього показника від 7–8% (гібриди Зубр та Mohawk) до 30% (Медове). Саме в цей час на лесоподібному суглинку додатковий полив не дав помітного результату (рис. 6).

Підживлення азотним добривом методом фертигації на

чорноземі сприяло посиленню вертикального росту сорго, крім гібрида Зубр, на 15–28%. На лесоподібному суглинку додавання азотного добрива суттєво не впливало на українські гібриди, однак мало помітний позитивний ефект (21–36%) на ріст американських. Фертигація з біогуматом зовсім не вплинула на ріст українських культиварів і мала слабкий вплив (7,5–11%) на американські.

Урожайність зеленої біомаси сорго контрольних варіантів, вирощеного на різних субстратах, суттєво не відрізнялася. У гібридів Медове, Зубр та SS506 урожай був трохи вище на лесоподібному суглинку (на 2,5–7%), у гібрида Mohawk, навпаки, нижче на 6,6% (табл. 1).

Додаткові заходи агротехніки сприяли підвищенню врожайності зеленої біомаси сорго. Найбільший ефект отриманий для американських гібридів, особливо для Mohawk (рис. 7).

На чорноземі врожайність цього культивуру збільшилася під впливом зрошення, додавання азотного добрива та біогумату на 26, 55 та 29%, відповідно. На лесоподібному суглинку ефект був ще більш помітним: 52, 93 та 45%, відповідно.

Реакція гібрида SS506 реєструвалася більш суттєвою на чорноземі, ніж на лесоподібному суглинку. Для українських гібридів внесення азотних добрив мало позитивний ефект на обох субстратах, тоді як дія біогумату проявилася лише на лесоподібному суглинку.

Урожайність зерна серед досліджених гібридів була найвищою в гібрида Медове на обох субстратах (табл. 2). Продуктивність гібрида Зубр на лесоподібному суглинку зареєстрована у два з половиною рази більша, ніж на чорноземі, тоді як для

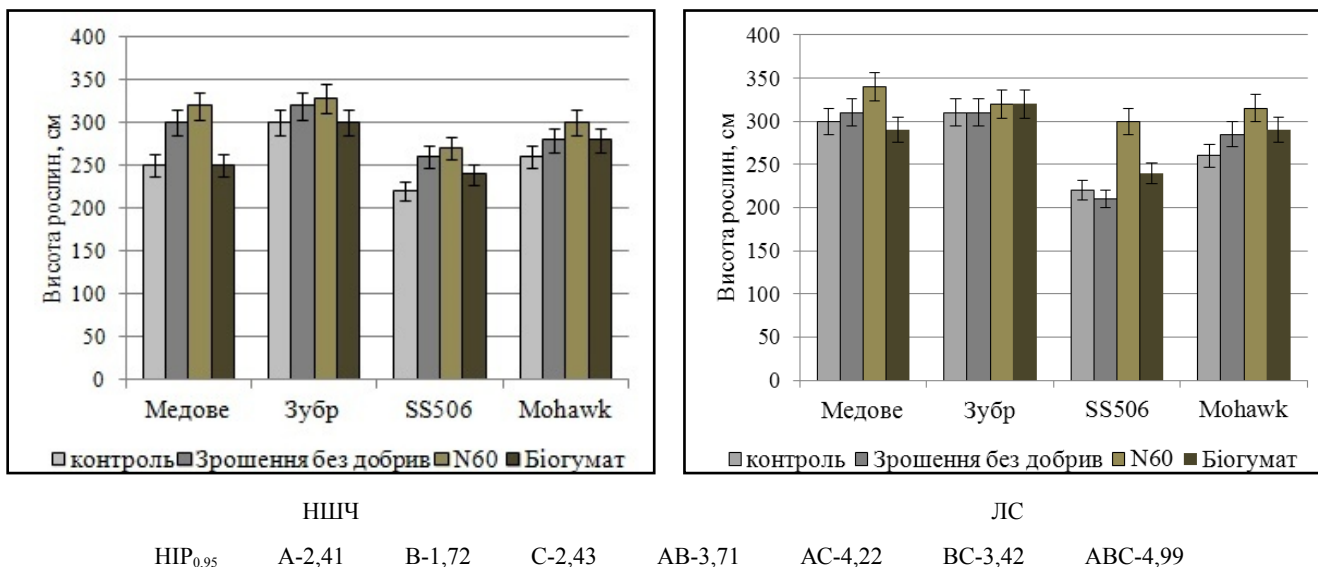


Рис. 6. Висота рослин цукрового сорго у 2019 р., см

Таблиця 1. Врожайність зеленої біомаси у 2019 році, т/га

Гібрид	Насипний шар чорнозему*				Лесоподібний суглинок*			
	К	З	N <sub>60</sub>	Б	К	З	N <sub>60</sub>	Б
Медове	76,0	84,2	98,6	79,6	77,8	86,0	98,2	87,9
Зубр	85,6	96,0	105,8	86,2	91,6	95,6	104,0	103,8
SS506	59,0	70,0	82,2	72,0	62,0	70,4	78,0	66,2
Mohawk	62,1	78,4	96,4	80,0	58,0	88,2	111,8	84,0
HP <sub>0,95</sub>	A-2,63	B-2,56	C-2,59	AB-2,71	AC-2,81	BC-2,96	ABC-3,49	

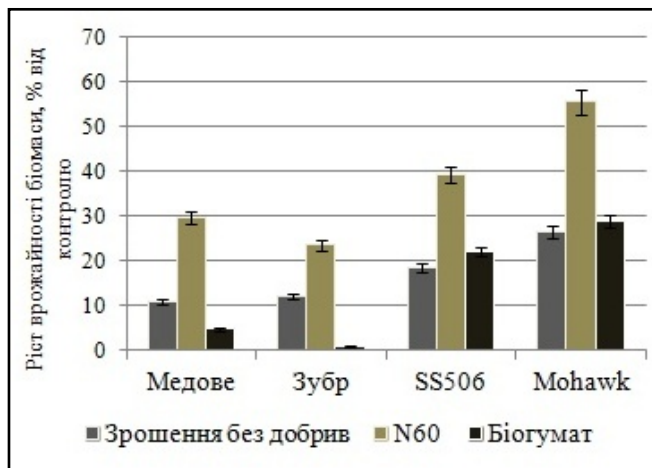
Примітка \* –К– контроль; З – зрошення без додавання добрив; N<sub>60</sub> – фертигація азотним добривом; Б – фертигація біогуматом.

гібрида SS506 спостерігалася зворотна динаміка.

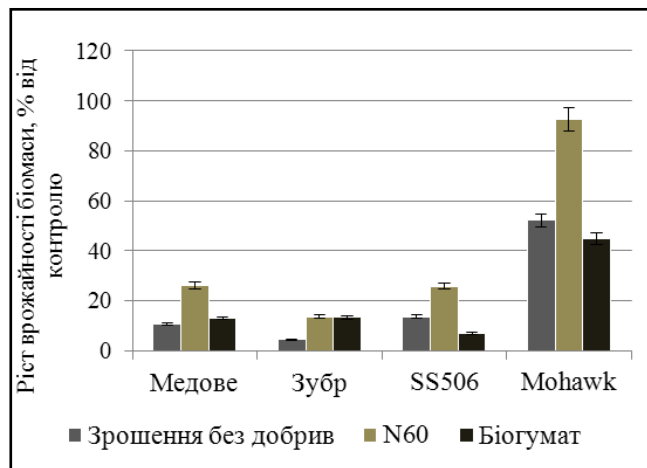
Того самого часу врожай сорго Mohawk був майже однаковим на обох субстратах. На чорноземі найбільший ефект від додаткового зрошення, внесення добрива та біогумату спостерігався для гібрида Зубр (167, 250 та 108%, відповідно). На лесоподібному суглинку суттєвий вплив відмічений тільки у варіантах з добривом та біогуматом (рис. 8).

Для гібридів Медове, SS506 та Mohawk на чорноземі полив та внесення мінерального добрива підвищували врожайність зерна на 30–76%, тоді як для біогумату була досить

незначною (6–20%). На лесоподібному суглинку для гібрида SS506 під впливом азотного добрива спостерігалася значне зростання врожаю зерна – 200%. Зрошення та фертигація біогуматом сприяли збільшенню продуктивності на 20% та 50%, відповідно. Для гібрида Mohawk тільки додавання мінерального добрива та біогумату мали позитивний вплив (56% та 33%, відповідно). Для гібрида Медове лише у варіанті з мінеральним добривом спостерігалася невелике (26%) підвищення врожайності.



НШЧ



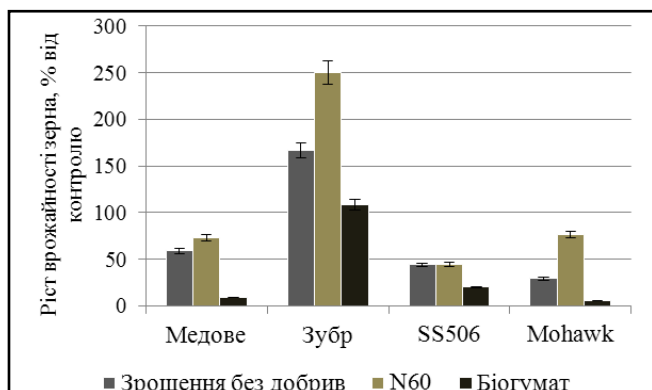
ЛС

Рис. 7. Вплив додаткового зрошення та підживлення на врожайність біомаси сорго у 2019 році, %

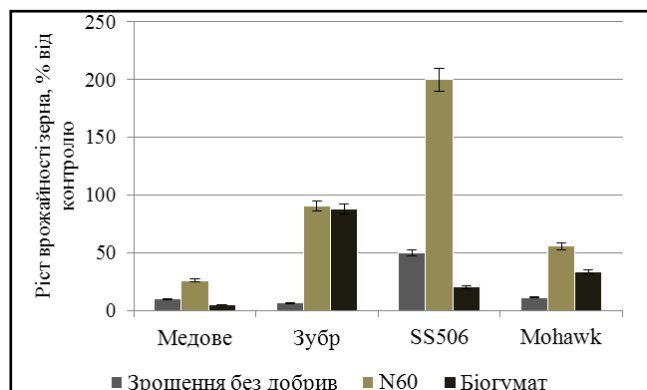
Таблиця 2. Врожайність зерна у 2019 році, т/га

Гібриди	Насипний шар чорнозему*				Лесоподібний суглинок*			
	К	З	N <sub>60</sub>	Б	К	З	N <sub>60</sub>	Б
Медове	4,4	7,0	7,6	4,8	6,2	6,8	7,8	6,5
Зубр	1,2	3,2	4,2	2,5	3,2	3,4	6,1	6,0
SS506	2,5	3,6	3,62	3,0	1,0	1,5	3,0	1,2
Mohawk	1,7	2,2	3,0	1,8	1,8	2,0	2,8	2,4
HIP <sub>0,95</sub>	A-1,23	B-0,87	C-1,23	AB-1,74	AC-2,46	BC-1,74	ABC-3,48	

Примітка \* –К– контроль; З– зрошення без додавання добрив; N<sub>60</sub> – фертигація азотним добривом; Б – фертигація біогуматом.



НШЧ



ЛС

Рис. 8. Вплив додаткового зрошення та підживлення на врожайність зерна сорго у 2019 році, %

Таблиця 3. Вміст цукру в стеблах сорго у 2019 р., %

Гібрид	Насипний шар чорнозему				Лесоподібний суглинок			
	К	З	N <sub>60</sub>	Б	К	З	N <sub>60</sub>	Б
Медове	18,0	18,7	20,7	18,3	17,7	18,3	20,0	18,0
Зубр	18,0	16,7	15,7	17,0	17,7	16,3	14,7	16,0
SS506	20,2	19,5	20,3	19,5	19,3	18,7	19,7	19,0
Mohawk	20,8	20,0	20,0	19,8	20,7	19,2	19,0	19,3
НІР <sub>0,95</sub>	A-2,03	B-2,49	C-2,46	AB-3,43	AC-3,36	BC-3,21	ABC-4,01	

Примітка \* –К – контроль; З – зрошення без додавання добрив; N<sub>60</sub> – фертигація азотним добривом; Б – фертигація біогуматом.

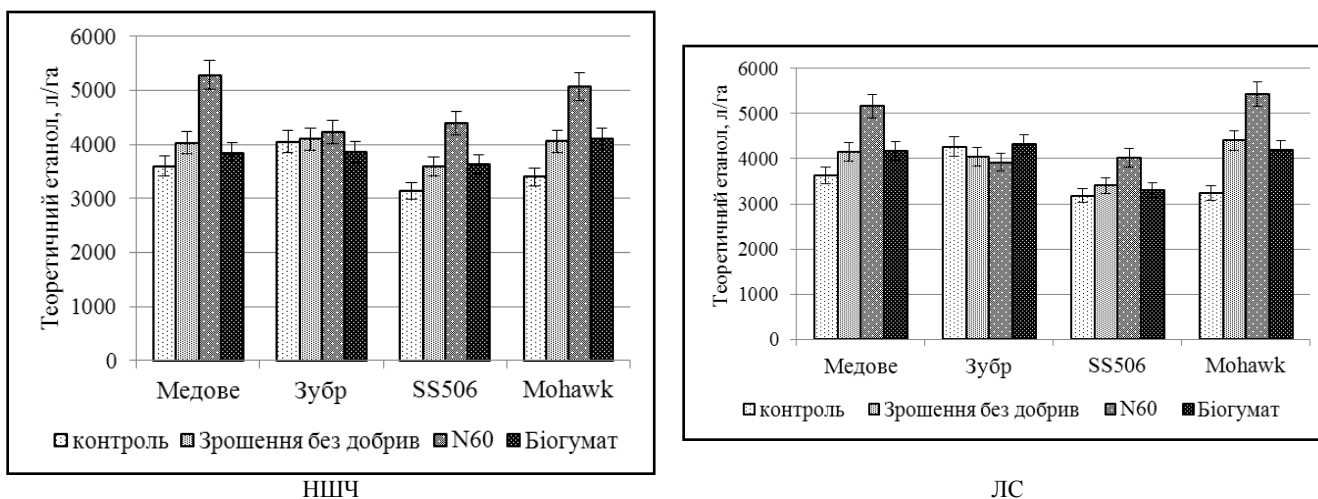


Рис. 9. Продукція теоретичного етанолу з цукрового сорго у 2019 р., л/га

Кількість соку в стеблах сорго та його цукристість є важливими показниками під час виробництва біоетанолу. Значення параметрів можуть змінюватися залежно від умов вирощування та під впливом факторів навколишнього середовища (Almorades et al., 2009). Найвищий вміст цукру в стеблах цукрового сорго виявлений у фазі молочно-воскової стиглості. Протягом років дослідження він варіював від 18% до 21% на чорноземі та від 17% до 21% на лесоподібному суглинку. Серед досліджених гібридів найвищою цукристістю стеблового соку характеризувався гібрид Mohawk, а найнижчою – гібрид Зубр. Відмічено також вплив агротехнічних заходів на значення даного показника в стеблах сорго у фазі молочно-воскової стиглості (табл. 3).

У гібрида Медове спостерігалось підвищення цукристості в усіх варіантах дослідження. Найвищий вплив отриманий у варіанті з азотним добривом, де вміст цукру підвищився на 2,3% (лесоподібний суглинок) та на 2,7% (чорнозем). Для інших сортів реєстрували динаміку зниження цукристості стеблового соку. Найбільші зниження цього показника спостерігали в гібрида Зубр: на 1,3–1,4% за умов додаткового поливу, на 1,0–1,7% при додаванні біогумату та на 1,0–1,7% у варіанті з азотним добривом. Гібрид Mohawk на чорноземі незначно знизив свою цукристість, а на лесоподібному суглинку – від 1,4% (біогумат) до 1,7% (азотне добриво). Найбільш стабільним вміст цукру виявився в стеблах гібрида SS506. Хоча на лесоподібному суглинку він і був менше, ніж на чорноземі, на 0,9%, однак коливання цього параметра в різних варіантах дослідження не перевищували 0,3%. Із урахуванням продуктивності біомаси, кількості соку та його цукристості був розрахований врожай теоретичного етанолу. Виявлено, що на малопродуктивних ґрунтах з українських культиварів Медове та Зубр мож-

на виробити до 4250 л/га етанолу. Потенціал американських гібридів SS506 та Mohawk дещо нижчий, до 3400 л/га.

Реакція американських гібридів на додаткові агротехнічні заходи була більш контрастною порівняно з українськими (рис. 9).

Наприклад, на чорноземі врожай теоретичного етанолу гібрида Медове в умовах додаткового поливу, фертигації з азотним добривом та біогуматом збільшився на 11,0; 46,7 та 6,5%, відповідно. В американського гібрида Mohawk збільшення становило 19,4; 49,3 та 20,6%. На лесоподібному суглинку ефект був ще більший: 14,3; 42,6 та 14,9% для гібрида Медове та 36,5, 68,3 та 29,9% для гібрида Mohawk.

#### Обговорення

Невибагливість сорго до умов навколишнього середовища визначає перспективу вирощування цієї рослини на рекультивованих землях, що дозволяє уникнути конфлікту між виробництвом харчових продуктів і біопалива. Нині отримано доволі багато даних, що засвідчують перспективу вирощування цукрового сорго на маргінальних землях (Wortmann et al., 2010; Mehmood et al., 2017). Наприклад, у північному і східному Китаї вивчені вихід біомаси, накопичення поживних речовин (N, P та K) і енергетична продуктивність сорго на малопродуктивних землях у посушливих і напівпосушливих умовах (Ren et al., 2012; Fu et al., 2016). Згідно з результатами польових дослідів, які проведені з цукровим сорго на мулистих, глинистих і супіщаних ґрунтах, оптимальна норма внесення азотних добрив знаходилась в межах від 60 до 120 кг/га (Holou et al., 2012; Ameen et al., 2017). У дослідженнях голландських учених з оцінки семи гібридів сорго на маргінальних та зональних родючих ґрун-

тах встановлена провідна роль гібрида в прояві адаптивного потенціалу в системі ґрунт–рослина (Schlemper et al., 2017). Відомо, що корені цукрового сорго виділяють складну суміш метаболітів у ризосферу (Wang et al., 2021). Первинні та вторинні метаболіти, що виділяються кореневою системою, є ключовими рушіями взаємодії мікробів корінь–ґрунт, які сприяють структурі та функції мікробних угруповань в агро-екосистемах. У наших дослідженнях 2019 року підвищення врожайності зеленої маси гібрида SS506 мало компенсаційну дію у варіантах з додатковим поливом та фертигації азотним добривом, незважаючи на зниження цукристості соку в стеблах гібрида SS506. У підсумку врожай теоретичного етанолу підвищився від 7,0–14,5% (на зрошенні) до 26,3–40,0% (азотне добриво). У випадку з гібридом Зубр додаткові агротехнічні заходи не мали позитивного впливу на врожай теоретичного етанолу. У деяких варіантах (біогумат на чорноземі, зрошення та фертигація азотним добривом на лесоподібному суглинку), навпаки, призвели до зниження продукції на 5–8%. Незважаючи на те, що у 2017–2018 рр. врожайність зеленої біомаси та цукристість стеблового соку майже в усіх гібридів була вище, ніж у 2019 р., кількість соку реєструвалася меншою. Це спричинило й менші на 29–30% вихід теоретичного етанолу на насипному шарі чорнозему для українських гібридів та на 15–18% для американських. На лесоподібному суглинку зменшення дорівнювало 5–15% для українських гібридів та 22–29% для американських.

## Висновки

Встановлено, що найбільш високорослими на рекультивованих землях були гібриди Зубр та Mohawk. Стабільно високі врожаї надземної біомаси на всіх фітомеліорованих гірничих субстратах здатний давати гібрид Зубр (72–101 т/га). Потенціал інших гібридів становить у середньому від 40 до 80 т/га. Додатковий полив та фертигація азотним добривом мають більший вплив на вертикальний ріст українських гібридів на насипному шарі чорнозему, а американських – на лесоподібному суглинку. Найбільший ефект підвищення врожайності зеленої біомаси був отриманий для американських гібридів, особливо для сорту Mohawk, вирощеного на лесоподібному суглинку. У цей же час реакція гібриду SS506 більш суттєва на чорноземі. Для українських гібридів внесення азотних добрив мало позитивний ефект на обох субстратах, тоді як дія біогумату проявилася лише на лесоподібному суглинку. На малопродуктивних ґрунтах з українських гібридів Медове та Зубр можна виробити від 3600 до 4250 л/га етанолу. Потенціал американських гібридів SS506 та Mohawk дещо нижчий – 3150–3400 л/га. Фертигація азотним добривом сприяє підвищенню виходу теоретичного етанолу від 27% до 68%, зрошення та додавання біогумату – від 15% до 36%.

Отримані результати свідчать про необхідність продовження досліджень шляхом переробки тростини цукрового сорго на сік та багасу з метою отримання і оцінки лабораторних зразків біоетанолу та пеллет.

## References

Adeyanju, A., Little, C., Yu, J., & Tesso, T. (2015). Genome-wide association study on resistance to stalk rot diseases in grain sorghum. *G3 (Bethesda)*, 5(6), 1165–1175.

Almorades, A., & Hadi, M. R. (2009). Production of bioethanol from sweet sorghum: A review. *African Journal of Agricultural Research*, 4(9), 772–780.

Ameen, A., Yang, X., Chen, F., Tang, C., Du, F., Fahad, S., & Xie, G. H. (2017). Biomass Yield and Nutrient Uptake of Energy Sorghum in Response to Nitrogen Fertilizer Rate on Marginal Land in a Semi-Arid Region. *BioEnergy Research*, 10(2), 363–37. doi: [10.1007/s12155-016-9804-5](https://doi.org/10.1007/s12155-016-9804-5)

Betancur, G. J. V., & Pereira, N. J. (2010). Sugar cane bagasse

as feedstock for second generation ethanol production. Part I: Diluted acid pretreatment optimization. *Electronic Journal of Biotechnology*, 13(3). doi: [10.2225/vol13-issue3-fulltext-3](https://doi.org/10.2225/vol13-issue3-fulltext-3)

Curovic, M., Pavicevic, K., Djokic, M., & Drobniak, D. (2016). Analysis of the energy potential of agricultural biomass residues in Montenegro. *Agriculture and Forestry*, 62(3), 277–284. doi: [10.17707/AgricultForest.62.3.22](https://doi.org/10.17707/AgricultForest.62.3.22)

Ekefre, D. E., Mahapatra, A. K., Latimore, J. M., Bellmer, D. D., Jena, U., Whitehead, G. J., & Williams, A. L. (2017). Evaluation of three cultivars of sweet sorghum as feedstocks for ethanol production in the Southeast United States. *Heliyon*, 3, e00490, 1–18. doi: [10.1016/j.heliyon.2017.e00490](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.e00490)

Fu, H. M., Meng, F. Y., Molatudi, R. L., & Zhang, B. G. (2016). Sorghum and Switchgrass as Biofuel Feedstocks on Marginal Lands in Northern China. *Bioenerg. Res.*, 9(2), 633–642. doi: [10.1007/s12155-015-9704-0](https://doi.org/10.1007/s12155-015-9704-0)

Holou, R. A., & Stevens, G. (2012). Sugar, and bagasse response of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench cv. M81E) to N fertilization and soil type. *GCB Bioenergy*, 4, 302–310. doi: [10.1111/j.1757-1707.2011.01126.x](https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01126.x)

Kharytonov, M. M., Gonchar, N. V., Gavryushenko, O. O., & Mytsyk, O. O. (2020). Ecological assessment of the state of rocks in the of reclamation process in the Nikopol Manganese Ore Basin. *Resource – saving technologies of raw material base development in mineral mining and processing*. Multi – authored monograph. 392–413. UNIVERSITAS Publishing, Petrosani, Romania.

Kharytonov, M. M., Martynova, N. V., Babenko, M. G., & Rula, I. V. (2020). Environmentally compatible utilization of reclaimed mine-lands for sustainable production food and bioenergy feedstock. In: Actual problems of natural sciences: modern scientific discussions: Collective monograph. 625–658. Baltija Riga Publishing.

Kim, M., & Day, D. F. (2011). Composition of sugar cane, energy cane, and sweet sorghum suitable for ethanol production at Louisiana sugar mills. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 38(7), 803–807. doi: [10.1007/s10295-010-0812-8](https://doi.org/10.1007/s10295-010-0812-8)

Mathur, S., Umakanth, A. V., Tonapi, V. A., Sharma, R., & Sharma, M. K. (2017). Sweet sorghum as biofuel feedstock: recent advances and available resources. *Biotechnol Biofuels*, 10, 146. doi: [10.1186/s13068-017-0834-9](https://doi.org/10.1186/s13068-017-0834-9)

Mehmood, M. F., Ibrahim, M., Rashid, U., Nawaz, M., Ali, S., Hussain, A., & Gull, G. (2017). Biomass production for bioenergy using marginal lands. *Sustainable Production and Consumption*, 9, 3–21. doi: [10.1016/j.spc.2016.08.003](https://doi.org/10.1016/j.spc.2016.08.003)

Mostenska, T., Kowalski, A., Fedulova, I., Wigier, M., Szczepaniak, I., & Bilan, Y. (2013). Growth and competitiveness factors of the agri-food sector in Poland and Ukraine against the background of global trends. NUFT, NRI-IAFE, CSR, Kyiv–Warsaw.

Rakhmetov, D. B., Vergun, O., Blum, Y. B., Rakhmetova, S. O., & Fishchenko, V. V. (2018). Biochemical composition of plant raw material of sweet sorghum (*Sorghum saccharatum* (L.) Moench) genotype. *Introduction of plants journal*, 83–90. doi: [10.5281/zenodo.2278755](https://doi.org/10.5281/zenodo.2278755)

Reddy, B. V. S., Ramesh, S., Reddy, P. S., Ramaiah, B., Salimath, P. M., & Rajashekar, K. (2005). Sweet Sorghum – A Potential Alternate Raw Material for Bio-Ethanol and Bioenergy. *International Sorghum and Millets Newsletter*, 46, 79–86.

Regassa, T. H., & Wortmann, C. S. (2014). Sweet sorghum as a bioenergy crop: literature review. *Biomass Bioenergy*, 64, 348–355. doi: [10.1016/j.biombioe.2014.03.052](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.052)

Ren, L. T., Liu, Z. X., Wei, T. Y., & Xie, G. H. (2012). Evaluation of energy input and output of sweet sorghum grown as a bioenergy crop on coastal saline–alkali land. *Energy*, 47, 166–173. doi: [10.1016/j.energy.2012.09.024](https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.09.024)

Schlemper, T. R., Leite, M. F. A., Lucheta, A. R., Shimels, M., Bouwmeester, H. J., van Veen, J. A., & Kuramae, E. E. (2017). Rhizobacterial community structure differences among sor-

- ghum cultivars. *FEMS Microbiol Ecol*, 93, 1–11. doi: [10.1093/femsec/fix096](https://doi.org/10.1093/femsec/fix096)
- Sipos, B., Reczey, J., Somorai, Z., Kadar, Z., Dienes, D., & Reczey, K. (2009). Sweet Sorghum as Feedstock for Ethanol Production: Enzymatic Hydrolysis of Steam-Pretreated Bagasse. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 153(1–3), 151–162. doi: [10.1007/s12010-008-8423-9](https://doi.org/10.1007/s12010-008-8423-9)
- Taylor, J. R. N., Schober, T. J., & Bean, S. R. (2006). Novel food and non-food uses for sorghum and millets. Review. *Journal of Cereal Science*, 44(3), 252–271. doi: [10.1016/j.jcs.2006.06.009](https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.06.009)
- Wang, P., Chai, Y. N., Roston, R., Dayan, F. E., & Schachtman, D. P. (2021). The Sorghum bicolor Root Exudate Sorgoleone Shapes Bacterial Communities and Delays Network Formation. *mSystems*, 16, 6(2), e00749-20. doi: [10.1128/mSystems.00749-20](https://doi.org/10.1128/mSystems.00749-20)
- Wortmann, C. S., Liska, A. J., Ferguson, R. B., Lyon, D. J., Klein, R. N., & Dweikat, I. (2010). Dryland Performance of Sweet Sorghum and Grain Crops for Biofuel in Nebraska. *Agronomy Journal*, 102(1), 319–326. doi: [10.2134/agronj2009.0271](https://doi.org/10.2134/agronj2009.0271)