 © Авторы статьи / Authors of the article

СЕЛЕКЦИЯ, СЕМЕНОВОДСТВО И БИОТЕХНОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ/PLANT BREEDING, SEED PRODUCTION AND BIOTECHNOLOGY

DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.16 EDN: NXUJWB

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ДИСАХАРОВ В СОКЕ СТЕБЛЯ ОБРАЗЦОВ САХАРНОГО СОРГО В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ФАЗЫ ВЕГЕТАЦИИ

Научная статья

Кибальник О.П.[1,] *, Каменева О.Б.[2], Черкасова Е.И.[3], Кибальник С.В.[4]

[1] ORCID : 0000-0002-1808-8974;

[2] ORCID : 0000-0003-1583-7711;

[3] ORCID : 0009-0003-9649-0082;

[4] ORCID : 0000-0003-4683-3393;

[1, 2, 3, 4] Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы, Саратов, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (kibalnik79[at]yandex.ru)

Предложена: 20.07.2026; Принята: 18.08.2026; Опубликована: 19.08.2026

Аннотация

Содержание сахаров в сорго является важным фактором для производства биоэтанола и пищевой продукции. В данной статье представлены результаты двухлетних исследований динамики накопления водорастворимых сахаров в соке стебля шести перспективных образцов сахарного сорго в почвенно-климатических условиях Нижнего Поволжья. Актуальность работы обусловлена высоким биоэнергетическим и пищевым потенциалом культуры, способной заменять традиционные сахароносы в регионах с засушливым климатом. Цель исследования заключалась в комплексной оценке селекционного материала на основе интенсивности накопления сахаров на различных стадиях развития растений. Полевой опыт был заложен в трехкратной повторности при использовании зональной агротехники. В ходе проведенных опытов была подтверждена общая биологическая закономерность последовательного увеличения концентрации дисахаров с фазы цветения до наступления полной спелости. Выявлено, что среднее содержание общего количества сахаров достоверно возрастает с 14,18% до 19,11%, а уровень сахарозы — с 10,94% до 18,06%. Расчет уравнений линейной регрессии показал, что общая сахаристость сока стебля на 76% детерминирована накоплением сахарозы, демонстрируя тесную прямую корреляционную связь (r=0,87), тогда как взаимосвязь с моносахарами оказалась статистически несущественной. Установлены генотипические различия между образцами и сильное влияние средовых гидротермических факторов на интенсивность накопления сахаров. На основе полученных данных предложены следующие сроки уборки для переработки: сорт Капитал эффективнее убирать в фазу молочно-восковой спелости, сортрообразец к-164 — в фазу восковой спелости, а селекционные линии Л-3, Л-21 и образец к-50 — в фазу полной спелости. Учет динамики накопления сахаров позволит оптимизировать производственные циклы.

Ключевые слова: сорго, общее содержание сахаров, дисахара, моносахара.

SPECIFICS OF DISACCHARIDE ACCUMULATION IN THE STEM SAP OF SUGAR SORGHUM SAMPLES, DEPENDING ON THE VEGETATION PHASE

Research article

Kibalnik O.P.[1,] *, Kameneva O.B.[2], Cherkasova E.I.[3], Kibalnik S.V.[4]

[1] ORCID : 0000-0002-1808-8974;

[2] ORCID : 0000-0003-1583-7711;

[3] ORCID : 0009-0003-9649-0082;

[4] ORCID : 0000-0003-4683-3393;

[1, 2, 3, 4] Russian Research and Design-Technological Institute of Sorghum and Corn, Saratov, Russian Federation

* Corresponding author (kibalnik79[at]yandex.ru)

Suggested: 20.07.2026; Accepted: 18.08.2026; Published: 19.08.2026

Abstract

The sugar content in sorghum is an important factor in the production of bioethanol and food products. This article presents the results of a two-year research into the dynamics of water-soluble sugar accumulation in the stem sap of six promising sugar sorghum varieties under the soil and climatic conditions of the Lower Volga region. The relevance of the work is due to the high bioenergy and food potential of the crop, which is capable of replacing traditional sugar crops in regions with an arid climate. The aim of the study was to conduct a comprehensive evaluation of the breeding material based on the rate of sugar accumulation at various stages of plant development. Field trials were set up in triplicate using zone-specific agronomic practices. The experiments confirmed the general biological pattern of a sequential increase in disaccharide concentration from the flowering stage until full ripeness was reached. It was found that the average total sugar content increased significantly from 14.18% to 19.11%, while the sucrose content rose from 10.94% to 18.06%. The calculation of linear regression equations showed that the total sugar content of stem sap is 76% determined by sucrose accumulation, demonstrating a strong positive correlation (r = 0.87), whilst the relationship with monosaccharides proved to be statistically insignificant. Genotypic

 © Авторы статьи / Authors of the article

differences between samples were identified, as was a strong influence of environmental hydrothermal factors on the rate of sugar accumulation. Based on the obtained data, the following harvest times for processing have been suggested: the Capital variety is best harvested during the milky-wax ripeness stage; the K-164 variety sample during the wax ripeness stage; and the selection lines L-3, L-21 and the K-50 sample during the full ripeness stage. Taking into account the dynamics of sugar accumulation will make it possible to optimise production cycles.

Keywords: sorghum, total sugar content, disaccharides, monosaccharides.

Введение

Сахарное сорго можно отнести к биоэнергетическим культурам благодаря способности накапливать большое количество водорастворимых сахаров в стебле и формировать высокий урожай биомассы в различных агроклиматических условиях и производственных системах с минимальными затратами [1]. Растительное сырье из этой культуры может быть переработано как в биотопливо, так и сахаросодержащие продукты. Сахарное сорго может заменить сахарный тростник, сахарную свеклу, кукурузу и пшеницу в регионах с экстремальными климатическими условиями [2].

В литературе отмечено, что накопление и распределение сахаров в стебле связано с прекращением роста междоузлий, которое совпадает с фазой цветения растений [3], [4]. При этом, самая высокая концентрация растворимых сухих веществ, сахаров в соке, урожайности сухой биомассы наблюдалась на стадии полного созревания растений сорго [1], [5]. Так, у большинства образцов сахарного сорго интенсивное накопление сахаров в соке стебля начинается с фазы цветения и увеличивается до созревания семян: от выхода в трубку до цветения количество сахаров увеличилось на 2,4%; от цветения до молочной спелости — на 3,8%; от молочной спелости до восковой — на 3,6%; от восковой до полной спелости — на 2,7% [5]. Согласно другому источнику литературы, сбор стеблей сахарного сорго в фазе полной спелости зерна позволяет в среднем на 3,2% повысить общее содержание сахаров в соке [6].

Подбор определенной фазы для сбора урожая имеет решающее значение для производственных посевов сахарного сорго и продления периода дальнейшей переработки. Учитывание динамики накопления сахаров и формирования урожая биомассы позволит целесообразно использовать сорта и гибриды в производстве [5]. Поэтому целью данного исследования было оценка образцов сахарного сорго на основе динамики накопления водорастворимых сахаров и сухой биомассы с учетом различных методов производства и фенологических стадий развития растений.

Методы и принципы исследования

Объектами исследований являются сортообразцы из коллекции ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова» (к-164, к-50), селекционные линии (Л-21 и Л-3), сорта Капитал и Волжское 51 (st) селекции ФГБНУ РосНИИСК «Россорго». Так, в течение 2024–2025 гг. изучение динамики накопления сахаров осуществляли у 6 образцов сахарного сорго.

Агротехника выращивания — зональная, разработанная научными учреждениями Нижнего Поволжья. Закладка делянок осуществлена согласно рекомендациям А.Н. Шепеля [8]: площадь делянок составила 7,7 м²; повторность трехкратная, размещение — рандомизированное. Густоту стояния растений корректировали до 100–150 тыс. раст/га. Сок, выделенный из стеблей, анализировали в лаборатории института методом ВЭЖХ с рефрактометрическим детектированием, позволяющим оценить качественный и количественный состав сахаров.

Обработка экспериментальных данных выполнена методом дисперсионного анализа с помощью программы Агрос 2.09.

Климатические условия проведения опыта характеризовались следующими гидротермическими показателями: ГТК составил 0,83 в 2024 г. и 0,61 в 2025 г.

Основные результаты и обсуждение

Сахарное сорго генетически очень разнообразно, и его агрономические параметры сильно различаются по сравнению с другими культурами [5]. В этой связи динамику накопления сахаров изучали на 6 образцах с высоким содержанием сахаров в соке стебля, различающихся по таким селекционно-ценным признакам как продолжительность вегетационного периода, высота растений, облиственность, урожайность стеблей и биомассы, диаметр стебля [9].

В литературе отмечено, что содержание сахарозы в общей доле водорастворимых сахаров возрастает от фазы выметывания до полной спелости зерна [10]. В наших исследованиях эта тенденция сохраняется у всех образцов на протяжении всего опыта. Однако наблюдаются генотипические особенности и влияние средового фактора.

Выявлено, что в течение вегетационного периода у коллекционного сортообразца к-164 и селекционной линии Л-21 последовательное накопление сахаров в соке стебля составило от 12,65–13,03% до 17,66–20,92%; сорт Волжское 51 и линия Л-3 характеризовались более стабильным синтезом водорастворимых сахаров: общее количество сахаров варьировало в интервале 19,18–22,94% и 18,34–20,39%, т.е. амплитуда изменчивости признака составила 3,76 и 2,05%, соответственно; у сортообразца к-50 наибольшая концентрация наблюдалась в фазу молочной спелости — 23,27%. Далее, отмечено резкое снижение синтеза сахаров (17,16–17,77%) и к полной спелости опять увеличение до 20,39%; у сорта Капитал выявлена неравномерность в накоплении общего содержания сахаров: в фазу молочной спелости наблюдалось снижение до 14,18%, а затем опять увеличение до 20,86% в фазу молочно-восковой спелости зерна (рис. 1). Так, в 2024 г. динамика накопления общего содержания водорастворимых сахаров в соке главного стебля шести образцов сорго также показала тенденцию к увеличению показателей к концу вегетации от 16,62 до 20,03%. Однако различия между фазами по синтезу водорастворимых сахаров оказались незначимыми (рис. 1).

 © Авторы статьи / Authors of the article

Рисунок 1 - Динамика накопления сахаров в соке образцов сахарного сорго, 2024 г
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.16.1

Наибольший синтез сахарозы отмечен в фазу молочная спелость у сортообразца к-50 (19,75%), затем показатель снижается до 14,44–14,59% и в фазу полной спелости повышается до 17,82%. Снижение накопления сахарозы до 15,42% в фазу молочной спелости зерна установлено и у селекционной линии Л-3. У сорта Капитал высокое содержание сахарозы отмечено в фазу молочно-восковой спелости — 20,64% (рис. 1). В среднем по образцам установлено увеличение сахарозы от 12,97% в фазу цветения до 19,30% в фазу полной спелости семян. Причем содержание сахарозы в цветение и молочной спелости существенно отличалось от ее количества в полную спелось семян (рис. 1).

В 2025 г. у коллекционных сортообразцов к-164, к-50 и сорта Капитал наибольшее содержание водорастворимых сахаров синтезировалось в фазы молочно-восковой и восковой спелости — 18,6–20,2%. Причем у коллекционных сортообразцов количество сахаров оказалось постоянным в данные фазы: к-50 — 18,6%, к-164 — 18,7%. В фазу полной спелости содержание сахаров снизилось до 17,3–18,8% (рис. 2). Сорт Волжское 51 и селекционные линии Л-3, Л-21 накапливали сахара в соке стебля постепенно и к концу вегетации их количество составило 16,5–19,3%. Линия Л-3 и сорт Волжское 51 в фазы молочно-восковой и восковой спелости синтезировали практически одинаковое количество сахаров — 16,3—16,6 и 15,7%, соответственно. В среднем по сортообразцам, отмечено увеличение содержание общего количества сахаров от фазы цветение до молочной спелости на 2,22%; от молочной спелости до молочно-восковой — 3,50%; от молочно-восковой о восковой спелости — 0,47%; от восковой до полной спелости — 0,26% (рис. 2).

Сорта Капитал и Волжское 51 выделились максимальным накоплением сахарозы в фазу восковая спелость — 19,79 и 13,97%, соответственно. У коллекционных сортообразцов и селекционных линий высокое количество сахарозы установлено в полную спелость — 16,43–17,93 и 16,44–18,33%, соответственно (рис. 2).

Расчет средних значений по изучаемым образцам сахарного сорго показал увеличение содержания количества сахарозы от 8,92 до 16,82%. Причем, от фазы цветение до молочной спелости прирост сахарозы составил 2,69%; от молочной спелости до молочно-восковой — 3,4%; от молочно-восковой о восковой спелости — 1,13%; от восковой до полной спелости — 0,68% (рис. 2).

 © Авторы статьи / Authors of the article

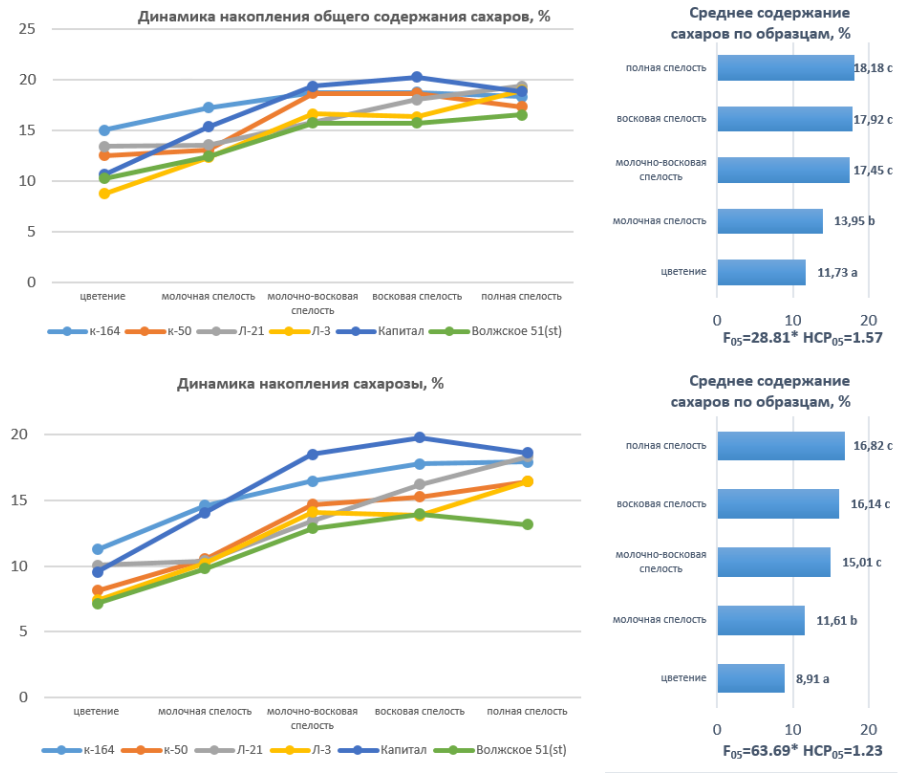

Рисунок 2 - Динамика накопления общего содержания сахаров и сахарозы в соке образцов сахарного сорго, 2025
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.16.2

Следует отметить, что в условиях 2025 г. динамика накопления сахаров отличалось от 2024 г. в фазы цветение и молочной спелости. Очевидно, низкий синтез сахаров в эти фазы связан с выпадением осадков в июле и августе — 34,9 и 35,9 мм, соответственно (рис. 3). В сентябре количество осадков составило всего 4,1 мм, и как следствие синтез сахаров в соке стебля значительно вырос. Таким образом, подтверждается тенденция интенсивности накопления сахаров у растений сахарного сорго, произрастающих в более засушливых условиях.

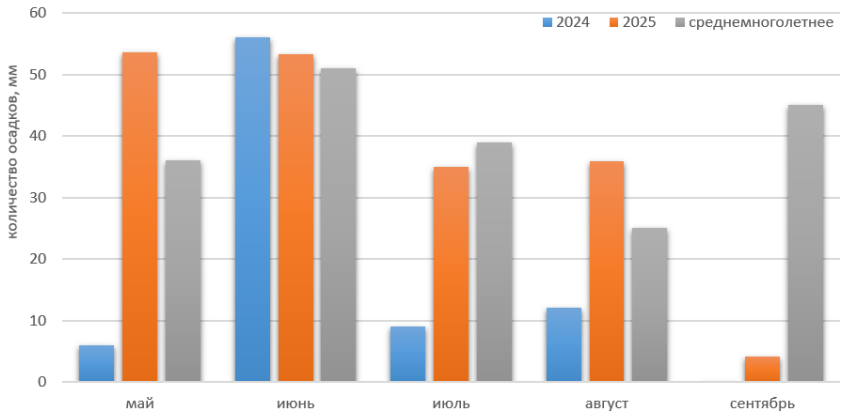

Рисунок 3 - Количество осадков за вегетационный период 2024-2025 гг. в сравнении со среднемноголетними данными
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.16.3

Согласно литературным данным, более интенсивный синтез сахаров происходит в периоды от цветения до восковой спелости, и в целом возрастает к полной спелости [6]. Полученные сведения о синтезе дисахаров также согласуются с результатами, полученными другими исследователями и подтверждают тенденцию возрастания количества сахарозы в общей доле водорастворимых сахаров к фазе полной спелости зерна [10]. В среднем за 2024–2025 гг. большинство изученных нами образцов соответствовали этой закономерности (рис. 4). Сорт Капитал накапливал максимальное количество водорастворимых сахаров уже в фазу молочно-восковой спелости (20,08%). В среднем по сортообразцам более интенсивный синтез общего количества сахаров наблюдался между фазами цветение-молочно-восковая спелость — 1,83–2,15%; в дальнейшие фазы вегетации — 0,35–0,60% (рис. 4). Очевидно,

 © Авторы статьи / Authors of the article

биоклиматический потенциал Саратовской области отражается на накоплении сахаров в последние фазы вегетации, что необходимо учитывать при подборе сортов для выращивания на технические и пищевые цели.

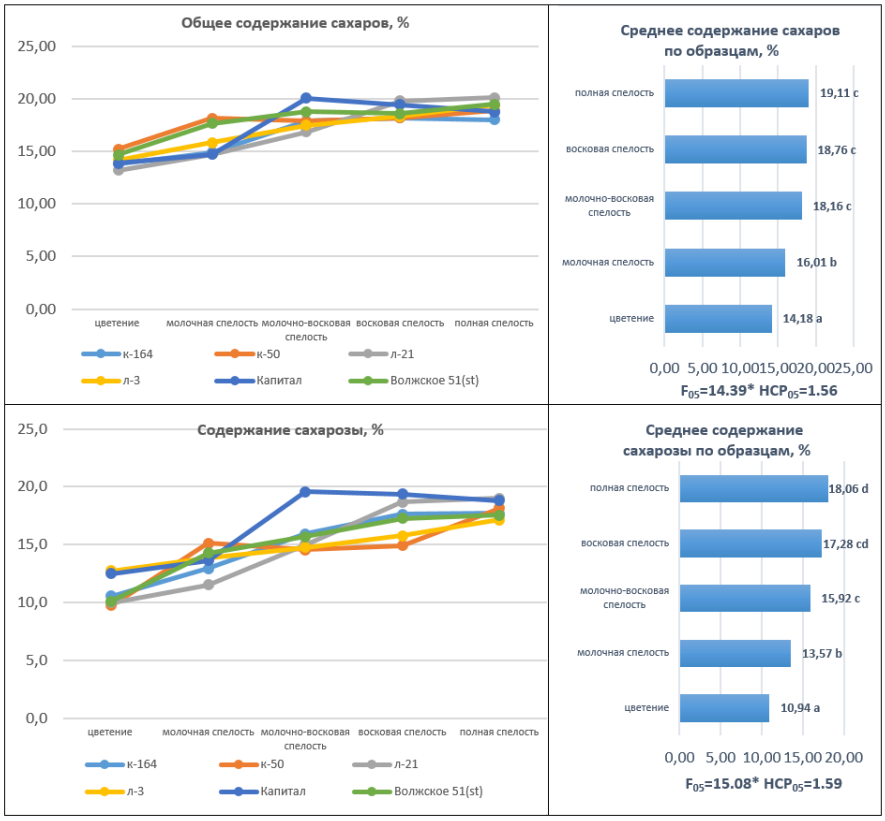

Рисунок 4 - Динамика накопления сахаров в соке образцов сахарного сорго в среднем за 2024-2025 гг
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.16.4

Расчет уравнения линейной регрессии показал, что накопление водорастворимых сахаров на 76% зависит от количества сахарозы в соке стебля, что свидетельствует о тесной корреляционной связи между этими показателями (r=0,87). Так, при увеличении сахарозы на 1% уровень общего содержания сахаров увеличивался на 0,65%. Отрицательная взаимосвязь общего содержания сахаров с синтезом моносахаров оказалась несущественной: коэффициент детерминации составил 0,03–0,08.

Заключение

1. Выявлена общая закономерность синтеза водорастворимых сахаров и в том числе сахарозы от фазы цветения до полной спелости. Более интенсивный синтез углеводов установлен в период от цветения до молочно-восковой спелости (амплитуда изменчивости общего количества сахаров составила 1,83–2,15%), сахарозы — от цветения до восковой спелости (амплитуда изменчивости количества сахарозы — 1,36–2,63%).

2. К уборке сырья для переработки на технические и пищевые цели рекомендуется образцы с максимальным накоплением сахаров в определенную фазу: с фазы молочно-восковой спелости — сорт Капитал; с фазы восковой спелости — к-164; с фазы полной спелости — Л-3, Л-21 и к-50, Волжское 51.

3. Согласно уравнению линейной регрессии, накопление водорастворимых сахаров зависит от количества сахарозы в соке стебля: коэффициент корреляции равен 0,87.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 124020300044-6 Министерства сельского хозяйства РФ согласно тематическому плана ФГБНУ РосНИИСК «Россорго».

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Чувилина В.А., Сахалинский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, Южно-Сахалинск Российская Федерация
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.16.5

Acknowledgement

This work was carried out as part of State Assignment No. 124020300044-6 of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation, in accordance with the thematic plan of the FSBSI Russian Scientific Research and Design and Technology Institute for Sorghum and Maize 'Rossorgo'.

Conflict of Interest

None declared.

Review

Chuvilina V.A., Sakhalin Scientific Research Institute of Agriculture, Yuzhno-Sakhalinsk Russian Federation
DOI: https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.16.5

Список литературы / References

1. Li Y. Transcriptome and metabolome reveal distinct carbon allocation patterns during internode sugar accumulation in different sorghum genotypes / Y. Li, W. Wang, Y. Feng et al. // Plant Biotechnol. J. — 2019. — № 17. — P. 472–487.

2. Rolz C. A multiple harvest cultivation strategy for ethanol production from sweet sorghum throughout the year in tropical ecosystems / C. Rolz, R. de Leon, A.L.M. de Montenegro et al. // Renewable Energy. — 2017. — № 106. — P. 103–110.

3. Shukla S. The relationship between plant height and sugar accumulation in the stems of sweet sorghum / S. Shukla, T.J. Felderstock, A. Saballos et al. // Field Crops Research. — 2017. — № 203. — P. 181–190.

4. Sipos B. Sweet sorghum as feedstock for ethanol production: enzymatic hydrolysis of steam-pretreated bagasse / B. Sipos, J. Reczey, Z. Somorai et al. // Applied Biochemistry and Biotechnology. — 2009. — № 153 (1-3). — P. 151–162.

5. Lopez-Sandin I. Biomass and sugar production dynamics in sweet sorghum variety Roger / I. Lopez-Sandin, G. Gutierrez-Soto, A. Gutierrez-Diez et al. // Chilean Journal of Agricultural Research. — 2021. — № 81 (1). — P. 92–101.

6. Кадралиев Д.С. Оценка сортообразцов сахарного сорго на урожайность зеленой массы и сахаристость стеблей / Д.С. Кадралиев, З.С. Щебарскова // Орошаемое земледелие. — 2019. — № 2. — С. 32–35.

7. Ганженко А.Н. Влияние сортовых особенностей на количество и качество сока из сахарного сорго / А.Н. Ганженко // Сахарная свекла. — 2019. — № 1. — С. 41–44.

8. Шепель Н.А. Селекция и семеноводство гибридного сорго / Н.А. Шепель. — Ростов-на-Дону: Ростовский университет, 1985. — 254 с.

9. Кибальник О.П. Прогнозирование и подбор исходного материала в селекции сахарного сорго на основе кластеризации / О.П. Кибальник, С.В. Кибальник // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). — 2024. — № 4 (73). — С. 54–61.

10. Ефремова Е.Н. Влияние агротехнических приемов на накопление сахаров в стеблях сахарного сорго в условиях Нижнего Поволжья / Е.Н. Ефремова, А.И. Беляев, Н.Ю. Петров // Новые технологии. — 2023. — № 19. — С. 91–102.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Li Y. Transcriptome and metabolome reveal distinct carbon allocation patterns during internode sugar accumulation in different sorghum genotypes / Y. Li, W. Wang, Y. Feng et al. // Plant Biotechnol. J. — 2019. — № 17. — P. 472–487.

2. Rolz C. A multiple harvest cultivation strategy for ethanol production from sweet sorghum throughout the year in tropical ecosystems / C. Rolz, R. de Leon, A.L.M. de Montenegro et al. // Renewable Energy. — 2017. — № 106. — P. 103–110.

3. Shukla S. The relationship between plant height and sugar accumulation in the stems of sweet sorghum / S. Shukla, T.J. Felderstock, A. Saballos et al. // Field Crops Research. — 2017. — № 203. — P. 181–190.

4. Sipos B. Sweet sorghum as feedstock for ethanol production: enzymatic hydrolysis of steam-pretreated bagasse / B. Sipos, J. Reczey, Z. Somorai et al. // Applied Biochemistry and Biotechnology. — 2009. — № 153 (1-3). — P. 151–162.

5. Lopez-Sandin I. Biomass and sugar production dynamics in sweet sorghum variety Roger / I. Lopez-Sandin, G. Gutierrez-Soto, A. Gutierrez-Diez et al. // Chilean Journal of Agricultural Research. — 2021. — № 81 (1). — P. 92–101.

6. Kadraliev D.S. Ocenka sortoobrazczov saxarnogo sorgo na urozhajnost' zelenoj massy' i saxaristost' steblej [Assessment of sugar sorghum variety samples on the yield of green mass and sugar content of stems] / D.S. Kadraliev, Z.S. Shhebarskova // Irrigated agriculture. — 2019. — № 2. — P. 32–35. [in Russian]

7. Ganzhenko A.N. Vliyanie sortovy'x osobennostej na kolichestvo i kachestvo soka iz saxarnogo sorgo [The effect of cultivar characteristics on the quantity and quality of juice from sweet sorghum] / A.N. Ganzhenko // Sugar Beet. — 2019. — № 1. — P. 41–44. [in Russian]

8. Shepel N.A. Selektsiya i semenovodstvo gibridnogo sorgo [Breeding and seed production of hybrid sorghum] / N.A. Shepel. — Rostov on Don: Rostov University, 1985. — 254 p. [in Russian]

9. Kibal'nik O.P. Prognozirovanie i podbor isxodnogo materiala v selekcii saxarnogo sorgo na osnove klasterizacii [Prediction and selection of initial material in sugar sorghum breeding based on clustering] / O.P. Kibal'nik, S.V. Kibal'nik // Bulletin of the Novosibirsk State Agrarian University. — 2024. — № 4 (73). — P. 54–61. [in Russian]

 © Авторы статьи / Authors of the article

10. Efremova E.N. Vliyanie agrotexnicheskix priemov na nakoplenie saxarov v steblyax saxarnogo sorgo v usloviyax Nizhnego Povolzh'ya [The influence of agrotechnical methods on the accumulation of sugars in the stems of sweet sorghum in the conditions of the Lower Volga region] / E.N. Efremova, A.I. Belyaev, N.Yu. Petrov // New Technologies. — 2023. — № 19. — P. 91–102. [in Russian]