

СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО

Научная статья

УДК 633.174:631.52[631.527.56+575.133]

doi: 10.55170/19973225_2023_8_3_11

**КОМБИНАЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ КОМПОНЕНТОВ СКРЕЩИВАНИЙ
ГИБРИДОВ F1 САХАРНОГО СОРГО ПО УРОЖАЙНОСТИ БИОМАССЫ**

Оксана Павловна Кибальник

Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы, Саратов, Россия

kibalnik79@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0002-1808-8974>

Цель исследований – оценка общей и специфической комбинационной способности изоядерных ЦМС-линий на основе стерильных цитоплазм А3, А4, 9Е и образцов сахарного сорго в системе тестерных скрещиваний. В настоящее время наиболее перспективным направлением селекции является создание гибридов F1 сахарного сорго, основанное на выявлении и подборе родительских форм с высокой комбинационной способностью. Исходный материал и гибриды F1 выращивали в засушливых условиях Саратовского Правобережья в 2016-2018 гг.: гидротермический коэффициент в периоды вегетаций составил 0,51-1,01. Оценка комбинационной способности компонентов скрещиваний проводили по методу топкросса. Гибриды F1 существенно различались по урожайности биомассы. Наиболее продуктивными оказались гибриды, у которых в качестве отцовской формы использовали линию Л-52/13 – 39,9-71,4 т/га. Анализ комбинационной способности компонентов скрещиваний на основе трехлетних результатов показал, что высокие эффекты ОКС отмечены у сортов Волжское 51 (1,91-11,31), Саратовское 90 (2,67-15,71) и линии Л-52/13 (2,38-5,54). Наибольшие дисперсии СКС выявлены у сорта Саратовское 90 (1,21-189,27) и линий Л-60/12 (9,98-14,53), Л-52/13 (30,43-54,83). Установлено, что тип стерильной цитоплазмы изоядерных ЦМС-линий не оказал существенного влияния на общую и специфическую комбинационную способность по урожайности биомассы. При этом, более высокие показатели эффектов ОКС (1,04-1,27) и дисперсий СКС (11,80-36,66) отмечены у 9Е Желтозерное 10 по сравнению с аналогами на стерильных цитоплазмах А3 и А4. Полученные сведения целесообразно использовать в селекционных программах по выведению высокопродуктивных гибридов сахарного сорго.

Ключевые слова: сорго, изоядерные ЦМС-линии, типы ЦМС, гибриды F1, эффекты ОКС, дисперсия СКС, урожайность биомассы.

Для цитирования: Кибальник О. П. Комбинационная способность компонентов скрещиваний гибридов F1 сахарного сорго по урожайности биомассы // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. № 3. С. 11–18. doi: 10.55170/19973225_2023_8_3_11

AGRICULTURE

Original article

**COMBINATIONAL ABILITY OF COMPONENTS CROSSES OF HYBRIDS F1
SUGAR SORGHUM ON BIOMASS YIELD**

Oksana P. Kibalnik

Russian Research and Design-Technological Institute of Sorghum and Corn, Saratov, Russia

kibalnik79@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0002-1808-8974>

The aim of the research is to evaluate the general (GCA) and specific combinational ability (SCA) of iso-nuclear CMS lines based on sterile cytoplasmas A3, A4, 9E and samples of sugar sorghum in the system of test crosses. Currently, the most promising direction of breeding is the creation of F1 hybrids of sugar sorghum, based on the identification and selection of parental forms with high combinational ability. The starting material and F1 hybrids were grown in the arid conditions of the Saratov Right Bank in 2016-2018: the hydrothermal coefficient during the growing season was

0.51-1.01. The evaluation of the combinational ability of the crossing components was carried out using the topcross method. F1 hybrids differed significantly in biomass yield. The most productive were hybrids, in which the line was used as the paternal form L-52/13 – 39,9-71,4 t/ha. The analysis of the combinational ability of the components of crosses based on three-year results showed that high effects of GCA were noted in the varieties Volzhskoe 51 (1.91-11.31), Saratovskoe 90 (2.67-15.71) and the line L-52/13 (2.38-5.54). The greatest SCA variances were found in the variety Saratovskoe 90 (1.21-189.27) and the lines L-60/12 (9.98-14.53), L-52/13 (30.43-54.83). It was found that the type of sterile cytoplasm of iso-nuclear CMS lines did not significantly affect the general and specific combinational ability of biomass yield. At the same time, higher rates of effects GCA (1.04-1.27) and dispersions SCA (11.80-36.66) were noted in 9E Zheltozyornoe 10 compared with analogues on sterile cytoplasmas A3 and A4. It is advisable to use the information obtained in breeding programs for the breeding of highly productive hybrids of sugar sorghum.

Keywords: sorghum, iso-nuclear CMS-lines, CMS types, F1 hybrids, effects GCA, dispersion SCA, biomass yield.

For citation: Kibalnik, O. P. (2023). Combinational ability of components crosses of hybrids F1 sugar sorghum on biomass yield. *Izvestiia Samarskoi gosudarstvennoi selskokhoziaistvennoi akademii (Bulletin Samara State Agricultural Academy)*, 3, 11–18 (in Russ.). doi: 10.55170/19973225_2023_8_3_11

В настоящее время сахарное сорго является востребованной сельскохозяйственной культурой, способной произрастать в засушливых регионах мира. Эта культура отличается широкой адаптивной способностью, высокорослостью, содержанием водорастворимых сахаров в соке главного стебля до 20%. Вместе с тем, это растение обладает высокой фотосинтетической эффективностью и может за короткий срок сформировать мощную биомассу. Сахарное сорго широко используется в приготовлении сочных кормов, а также является альтернативным источником биотоплива и сахаросодержащей продукции [1-4].

Известно, что у гибридов F1 часто проявляется эффект гетерозиса по многим хозяйственным признакам, в том числе и по урожайности биомассы, который зависит от правильно подобранных родительских пар и активно используется селекционерами. Поэтому выявление компонентов скрещиваний с высокой комбинационной способностью – это основной этап в селекции на гетерозис. Как правило, в качестве материнской формы используют линии с цитоплазматической мужской стерильностью (ЦМС), а отцовской – сорта и линии [4-5].

У сорго обнаружено большое количество различных типов стерильных цитоплазм. Однако, наибольшее распространение в создании коммерческих гибридов получила A1 (*mil0*). Для расширения генетического разнообразия гибридов первого поколения в практической селекции важно использовать новые типы стерильных цитоплазм (A2, A3, A4, A5, A6, 9E и др.) наряду с традиционной цитоплазмой A1 [6]. Влияние альтернативных типов ЦМС-индуцирующих цитоплазм у сорго на проявление селекционно-ценных признаков изучено не достаточно полно. В основном, в литературе встречаются сведения о цитоплазматических эффектах типов A1, A2, A3 [7-8]. Следует отметить, что аналогичные работы встречаются по таким сельскохозяйственным культурам как кукуруза [9], африканское просо [10], подсолнечник [11], рис [12] и др.

Цель исследований – оценка общей и специфической комбинационной способности изоядерных ЦМС-линий на основе стерильных цитоплазм A3, A4, 9E и образцов сахарного сорго в системе тестерных скрещиваний.

Задачи исследований – определение эффектов ОКС и дисперсий СКС компонентов скрещиваний по урожайности надземной биомассы.

Материал и методы исследований. Гибриды первого поколения (всего 39) и родительские формы сорго выращивали на опытном поле ФГБУ РосНИИСК «Россорго» в 2016-2018 гг. (г. Саратов). Изоядерные ЦМС-линии зернового сорго (всего 3), используемые в качестве материнских форм – A3 Желтозерное 10, A4 Желтозерное 10 и 9E Желтозерное 10, различались только генетически различным типом стерильной цитоплазмы [13]. Отцовские формы (всего 13) – сорта и линии сахарного сорго (Волжское 51, Флагман, Чайка, Сахара, Саратовское 90, Камышинское 8, Кинельское 3, к-64, Л-60/12, Л-39/12, Л-42/13, Л-59/13, Л-52/13) – отличались между собой по основным хозяйственно-ценным признакам. Большинство образцов, участвующих в скрещиваниях, селекции ФГБУ РосНИИСК «Россорго». Исключение составили Камышинское 8 (ФГБУ Федеральный

научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН), Саратовское 90 (ФГБНУ «ФАНЦ Юго-Востока»), Кинельское 3 (ФГБНУ Поволжский НИИ селекции и семеноводства им. П. Н. Константинова) и коллекционный сортообразец к-64 (ФИЦ Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова). Почва опытного участка представлена черноземом южным среднесуглинистым. Содержание гумуса в пахотном слое составляет 3,5%. Посев проведен широкорядным способом с междурядьем 70 см во второй-третьей декаде мая. Повторность в опыте трехкратная. Размещение делянок площадью 7,7 м² рендомизированное. Густоту стояния растений устанавливали вручную – 100-150 тыс. раст./га. Учет урожайности биомассы проводили по методике государственного испытания сельскохозяйственных культур [14].

Статистическая обработка экспериментальных результатов исследований выполнена дисперсионным однофакторным анализом с помощью программы «Агрос 2.09». Комбинационную способность родительских форм определяли по методу топкросса [15].

Гидротермический коэффициент (ГТК) за период со второй декады мая по вторую декаду сентября составил в 2016 и 2018 гг. 0,51-0,68 (сумма активных температур – 2696-2702°C, количество осадков – 137,3-184,6 мм), что свидетельствует о засушливых условиях. Согласно ГТК (равен 1,01) наиболее влагообеспеченным оказался 2017 год (сумма активных температур – 2475°C и количество осадков – 248,9 мм).

Результаты исследований. Дисперсионным анализом подтверждены различия между ежегодно испытываемыми 39 гибридами F₁ сахарного сорго по урожайности биомассы, которая варьировала в зависимости от условий года возделывания: в 2016 г. от 18,0 т/га (в скрещиваниях с линией Л-59/13) до 45,8 т/га (в скрещиваниях с сортом Волжское 51); в 2017 г. от 29,4 т/га (в скрещиваниях с линией Л-59/13) до 46,8 т/га (в скрещиваниях с линией Л-52/13); в 2018 г. от 30,6 т/га (в скрещиваниях с сортом Чайка) до 71,4 т/га (в скрещиваниях с линией Л-52/13) (рис. 1). Более высокую урожайность вегетативной массы гибриды F₁ сформировали в 2018 г.: в комбинациях с сортами Флагман, Саратовское 90 – 62,0-67,6 т/га; линиями Л-39/12, Л-52-13 – 66,1-71,4 т/га.

Результаты статистического анализа комбинационной способности показали значимые различия между сортами и линиями сахарного сорго по ОКС ($F_{05} \geq F_{теор.}$) (табл. 1).

Таблица 1

Результаты дисперсионного анализа комбинационной способности
компонентов скрещиваний (2016-2018 гг.)

Показатель	df	2016 г.		2017 г.		2018 г.	
		ms	F ₀₅	ms	F ₀₅	ms	F ₀₅
ОКС (образцов)	12	110,93	27,87*	46,95	2,74*	256,67	11,68*
ОКС (ЦМС-линий)	2	10,65	2,67	28,47	1,66	27,40	1,24
СКС	24	9,56	2,40*	16,70	0,97	40,66	1,85*
Случайное	76	3,97		17,11		21,95	

Примечание: * – $p \leq 0,05$.

Отношение среднеквадратических отклонений общей и специфической комбинационной способности по урожайности биомассы свидетельствует, что у сортов и линий, вовлеченных в систему тестерных скрещиваний, в генетическом контроле участвуют гены с аддитивным эффектом: $ms_{ОКС}/ms_{СКС} = 2,81-11,60$ (табл. 1).

Ежегодно положительные эффекты ОКС выявлены у сортов Волжское 51 (1,91-11,31), Саратовское 90 (2,28-5,54) и линии Л-52/13 (2,67-15,71) (табл. 2). Сорта Чайка и Кинельское 3, линии Л-60/12 и Л-59/13 в каждый год показывали низкую комбинационную способность в скрещиваниях с ЦМС-линиями с геномом Желтозерного 10 на основе А3, А4 и 9Е типов цитоплазм: эффекты ОКС составили -12,96...-1,40; -3,02...-0,16; -7,72...-1,00; -11,49...-6,76, соответственно.

Интересно отметить, что у некоторых отцовских форм отмечены различные эффекты ОКС в зависимости от гидротермических условий возделывания гибридов F₁. В более засушливых условиях общая комбинационная способность линий Л-39/12 (в 2016 г.), Л-42/13 (в 2018 г.) оказалась ниже, о чем свидетельствуют отрицательные эффекты ОКС. С другой стороны, у сортов Флагман и Сахара более низкие значения эффектов ОКС отмечены в 2017 г., характеризующемся достаточной влагообеспеченностью.

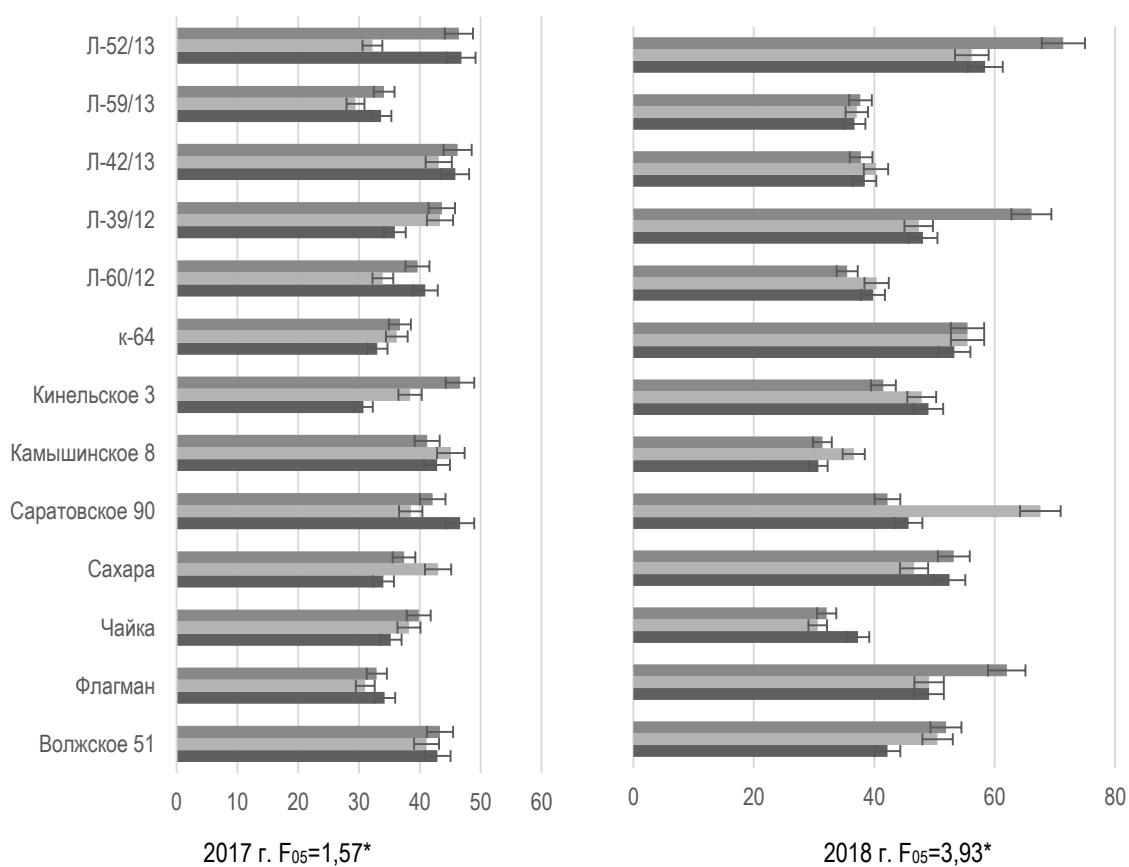
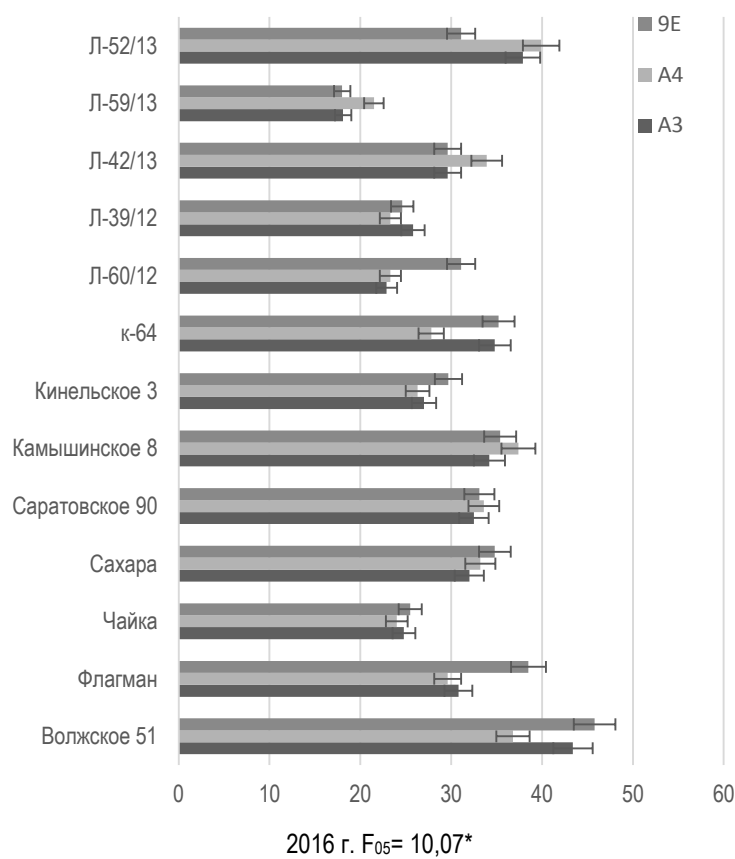


Рис. 1. Урожайность биомассы гибридов F1 сахарного сорго на основе изоядерных ЦМС-линий с типами цитоплазм А3, А4 и 9Е, т/га (* – $p \leq 0,05$)

Таблица 2

Эффекты ОКС и дисперсии СКС сортов и линий сахарного сорго (2016-2018 гг.)

Сорт, линия	Эффекты ОКС			Дисперсии СКС		
	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.
Волжское 51	11,31	3,30	1,91	15,82	0,78	14,69
Флагман	2,28	-6,43	7,11	15,40	3,17	41,17
Чайка	-5,92	-1,40	-12,96	0,15	3,53	23,16
Сахара	2,65	-0,86	4,48	0,66	26,88	16,19
Саратовское 90	2,38	3,27	5,54	1,21	16,60	189,27
Камышинское 8	4,98	3,90	-13,39	4,24	11,40	9,78
Кинельское 3	-3,02	-0,56	-0,16	0,80	48,60	28,39
к-64	1,91	-3,83	8,48	13,23	3,84	0,24
Л-60/12	-4,92	-1,00	-7,72	13,96	9,98	14,53
Л-39/12	-6,12	1,80	7,58	2,02	17,13	91,80
Л-42/13	0,35	5,90	-7,46	9,74	1,19	3,99
Л-59/13	-11,49	-6,76	-9,12	7,07	3,08	0,97
Л-52/13	5,61	2,67	15,71	30,43	54,83	53,74

Стабильные значения дисперсий СКС по годам исследований выявлены у линии Л-60/12 и Л-52/13 – 9,98-14,53 и 30,43-54,83, соответственно (табл. 2). Причем, высокая специфическая комбинационная способность в 2016-2017 гг. установлена у линии Л-52/13, а в 2018 г. – у сорта Саратовское 90 и линии Л-39/12 (91,80-189,27). Следует отметить, что высокая комбинационная способность линий сахарного сорго селекции института установлена и в скрещиваниях с ЦМС-линиями на основе стерильной цитоплазмы А2 [5].

Изучение влияния различных стерильных цитоплазм на комбинационную способность изоядерных ЦМС-линий по селекционно-ценным признакам у сорго представляет не только фундаментальный, но и практический интерес. Включение в селекционный процесс альтернативных типов стерильных цитоплазм позволит избежать снижения выращивания гибридов в случае массовых поражений их болезнями или вредителями. В проводимых исследованиях тип стерильной цитоплазмы не оказывал значимого влияния на эффекты ОКС стерильных линий по урожайности биомассы ($F_{05} < F_{теор}$). Однако, ежегодно более высокие эффекты ОКС отмечены у ЦМС-линии 9Е Желтозерное 10 – 1,04-1,27. Наибольшие значения дисперсии СКС также установлены у материнской линии на цитоплазме 9Е – 11,80-36,66 (рис. 2).

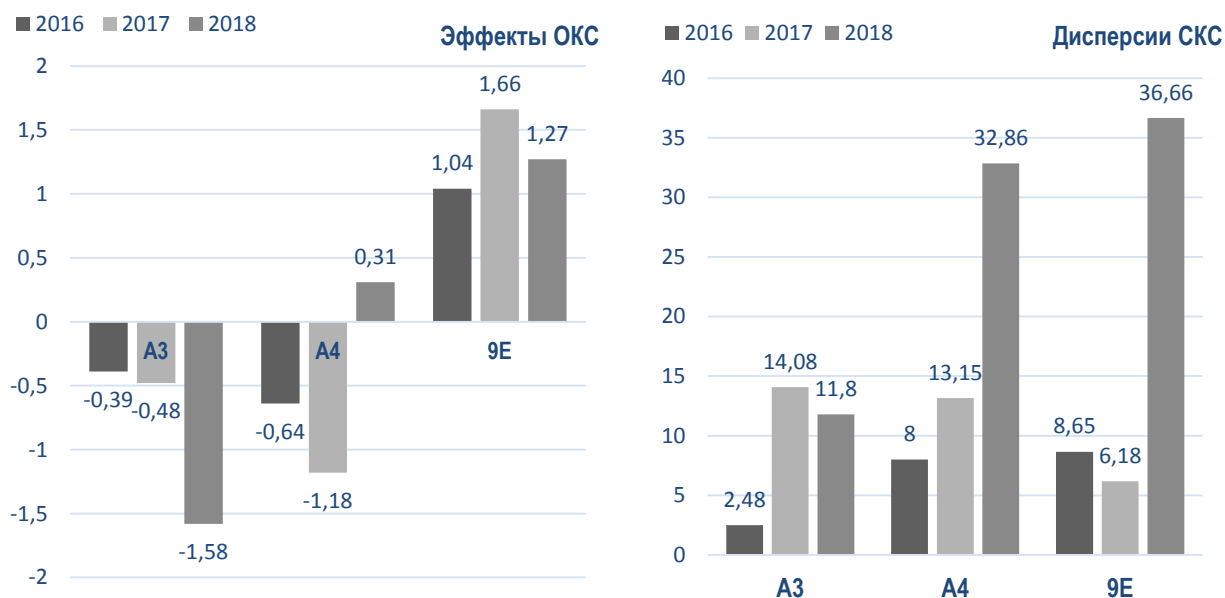


Рис. 2. Эффекты ОКС и дисперсии СКС изоядерных ЦМС-линий сорго на основе стерильных цитоплазм А3, А4 и 9Е (2016-2018 гг.)

Отношение среднеквадратических отклонений показало, что у материнских форм в генетическом контроле данного признака наблюдается преимущество аддитивных эффектов над неаддитивными в условиях 2016-2017 гг.: $ms_{OKC}/ms_{CKC} = 1,11-1,70$, за исключением 2018 г., когда $ms_{OKC}/ms_{CKC} = 0,67$.

Отсутствие влияния разных типов стерильных цитоплазм на комбинационную способность изоядерных ЦМС-линий по урожайности биомассы в скрещиваниях с образцами сахарного сорго отражены и в работах L. Hoffmann и W. L. Rooney [16]. Вместе с тем, в скрещиваниях этого же набора изоядерных ЦМС-линий на основе А3, А4 и 9Е цитоплазм с образцами зернового сорго отмечено существенное влияние цитоплазмы 9Е на комбинационную способность стерильных линий по формированию надземной биомассы, а также длины соцветия и длины наибольшего листа, особенно проявляющееся в засушливые сезоны [17-18].

Заключение. Анализ комбинационной способности родительских форм гибридов F1 сахарного сорго позволил выделить компоненты с высокой общей и специфической комбинационной способностью. Установлено, что в данных тестерных скрещиваниях генетический контроль урожайности биомассы сорго осуществляют гены с аддитивным эффектом. Высокопродуктивные гибриды F1 рекомендуется создавать с привлечением в качестве отцовского родителя сорго сортов Волжское 51 и Саратовское 90, линий Л-60/12 и Л-52/13. При этом, за период трехлетних исследований Волжское 51 характеризуется высокой общей КС, Л-60/12 – специфической КС, а Саратовское 90 и Л-52/13 отличаются значительными эффектами ОКС и дисперсиями СКС. В дальнейшей селекционной работе по созданию высокопродуктивных гибридов сахарного сорго в качестве альтернативного источника цитоплазматической мужской стерильности возможно использование стерильной цитоплазмы 9Е, характеризующейся высокими эффектами ОКС и дисперсиями СКС по изучаемому признаку – 1,04-1,27 и 11,80-36,66, соответственно.

Список источников

1. Володин А. Б., Капустин С. И., Саварцев М. А. Новые нетрадиционные источники сырья для производства пищевого и кормового сахара // Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования. 2016. №1. С. 305–308.
2. Аскарбеков Э. Б., Байгазиева Г. И., Мамаева Л. А. Разработка технологии спирта из сахарного сорго отечественной селекции // Новости науки в АПК. 2018. №1(11). С. 32–43.
3. de Oliveira T. C., de Oliveira A. J., da Almici M. S., dos Santos A. A. C., da Silva V. P., Pires A. S. C., Morais L. H. P., Rodrigues J. C. C., Barelli M. A. A., Tardin F. D. Yield components in sweet sorghum genotypes // Research, Society and Development. 2021. Vol. 10, № 6. P. e35310615965. doi: 10.33448/rsd-v10i6.15965.
4. Oliveira I. C. M., Marçal T. D. S., da Costa Bernardino K., de Oliveira Ribeiro P. C., da Costa Parrella R. A., Carneiro P. C. S., Schaffert R. E., de Souza Carneiro J. E. Combining Ability of Biomass Sorghum Lines for Agroindustrial Characters and Multitrait Selection of Photosensitive Hybrids for Energy Cogeneration // Crop Science. 2019. Vol. 59. P. 1554–1566. doi:10.2135/cropsci2018.11.0693.
5. Жужукин В. И., Горбунов В. С., Кибальник О. П., Семин Д. С., Гаршин А. Ю. Изучение комбинационной способности сортообразцов сахарного сорго по биохимическому составу биомассы и зерна // Российская сельскохозяйственная наука. 2017. №5. С. 11–14.
6. Кибальник О. П. Комбинационная способность ЦМС-линий зернового сорго на основе А1, А2, А3, А4, 9Е и М-35-1А типов цитоплазматической мужской стерильности // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2017. №21(6). С. 651–656. doi 10.18699/VJ17.282.
7. Reddy B. V. S., Ramesh S., Reddy S. P., Ramaiah B. Combining ability and heterosis as influenced by male-sterility inducing cytoplasms in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] // Euphytica. 2007. Vol. 154. P. 153–164.
8. Aruna C., Shrotria P. K., Pahuja S. K., Umakanth A. V., Brat B. V., Devender A. V., Patil J. V. Fodder yield and quality in forage sorghum: scope for improvement through diverse male sterile cytoplasms // Crop & Pasture Science. 2012. Vol. 63. P. 1114–1123. doi 10.1071/CP12215.
9. Pal S., Zunjare R. U., Muthusamy V., Duo H., Gowda M. M., Bhowmick P. K., Kasana R., Hossain F. Influence of T-, C- and S-cytoplasms on male sterility and their utilization in baby corn hybrid breeding // Euphytica. 2020. Vol. 216. P. e146. Doi 10.1007/s10681-020-02682-y.
10. Pujar M., Govindaraj M., Gangaprasad S., Kanatti A. Effect of isonuclear-alloplasmic cytoplasmic male sterility on grain yield in pearl millet // Indian Journal of Genetics and Plant Breeding. 2019. Vol. 79. P. 141–149. doi 10.31742/IJGPB.79S.1.3.

11. Tyagi V., Dhillon S. K. Cytoplasmic effect on combining ability for agronomic traits in sunflower under different irrigation regimes // *SABRAO Journal Breeding Genetics*. 2016. Vol. 48(3). P. 295–308.
12. Young J. B., Virmani S. S. Effect of cytoplasm on heterosis and combining ability for agronomic traits in rice (*Oriza sativa* L.) // *Euphytica*. 1990. Vol. 48. P. 177–188.
13. Эльконин Л. А., Кожемякин В. В., Ишин А. Г. Использование новых типов ЦМС-индуцирующих цитоплазм для создания скороспелых линий сорго с мужской стерильностью // *Доклады РАСХ*. 1997. №2. С. 7–9.
14. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Вып. 2. М. : Госагропром, 1989. 194 с.
15. Савченко В. К. Метод оценки комбинационной способности генетически разнокачественных наборов родительских форм. Методики генетико-селекционного и генетического экспериментов. Минск : Наука и техника, 1973. 48 с.
16. Hoffmann L., Rooney W. L. Cytoplasm Has No Effect on the Yield and Quality of Biomass Sorghum Hybrids // *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*. 2013. Vol. 2. P. 129–134. doi 10.4236/JSBS.2013.32018.
17. Elkonin L., Kibalnik O., Zavalishina A., Gerashchenkov G. Genetic Function of Cytoplasm in Plants with Special Emphasis on Sorghum / In *Chloroplasts and Cytoplasm. Structure and Function*. Eds. C. Dejesus, L. Trask. New York : Nova Publ., 2018. P. 97–154.
18. Кибальник О. П., Эльконин Л. А. Влияние разных типов стерильных цитоплазм (A3, A4, 9E) на комбинационную способность ЦМС-линий сорго // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2020. №24(6). С. 549–556. doi 10.18699/VJ20.648.

References

1. Volodin, A. B., Kapustin, S. I. & Savartsev, M. A. (2016). New non-traditional sources of raw materials for the production of food and feed sugar. *Novye i netradicionnye rasteniia i perspektivy ih ispolzovaniia (New and non-traditional plants and prospects for their use)*, 1, 305–308 (In Russ.).
2. Askarbekov, E. B., Baygazieva, G. I. & Mamaeva, L. A. (2018). Development of alcohol technology from sugar sorghum of domestic selection. *Novosti nauki i APK (Science news in the agro-industrial complex)*, 1(11), 32–43 (in Russ.).
3. de Oliveira, T. C., de Oliveira, A. J., da Almici, M. S., dos Santos, A. A. C., da Silva, V. P., Pires, A. S. C., Moraes, L. H. P., Rodrigues, J. C. C., Barelli, M. A. A. & Tardin, F. D. (2021). Yield components in sweet sorghum genotypes. *Research, Society and Development*, 10, 6, 35310615965. doi: 10.33448/rsd-v10i6.15965.
4. Oliveira, I. C. M., Marçal, T. d. S., da Costa Bernardino, K., de Olivera Ribeiro, P. C., da Costa Parrella, R. A., Carneiro, P. C. S., Schaffert, R. E. & de Souza Carneiro, J. E. (2019). Combining Ability of Biomass Sorghum Lines for Agroindustrial Characters and Multitrait Selection of Photosensitive Hybrids for Energy Cogeneration. *Crop Science*, 59, 1554–1566. doi:10.2135/cropsci2018.11.0693.
5. Zhuzhukin, V. I., Gorbunov, V. S., Kibalnik, O. P., Semin, D. S. & Garshin, A. Yu. (2017). Study of the combinational ability of sugar sorghum cultivars according to the biochemical composition of biomass and grain. *Rossiiskaia selskokhoziaistvennaia nauka (Russian Agricultural Sciences)*, 43(6), 456 (in Russ.).
6. Kibalnik, O. P. (2017). Combinational ability of CMS lines of grain sorghum based on A1, A2, A3, A4, 9E and M-35-1A types of cytoplasmic male sterility. *Vavilovskii zhurnal genetiki i seleksii (Vavilov Journal of Genetics and Breeding)*, 21(6), 651–656. doi 10.18699/VJ17.282 (in Russ.).
7. Reddy, B. V. S., Ramesh, S., Reddy, S. P. & Ramaiah, B. (2007). Combining ability and heterosis as influenced by male-sterility inducing cytoplasm in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. *Euphytica*, 154, 153–164.
8. Aruna, C., Shrotria, P. K., Pahuja, S. K., Umakanth, A. V., Brat, B. V., Devender, A. V. & Patil, J. V. (2012). Fodder yield and quality in forage sorghum: scope for improvement through diverse male sterile cytoplasm. *Crop & Pasture Science*, 63, 1114–1123. doi 10.1071/CP12215.
9. Pal, S., Zunjare, R. U., Muthusamy, V., Duo, H., Gowda, M. M., Bhowmick, P. K., Kasana, R. & Hossain, F. (2020). Influence of T-, C- and S-cytoplasm on male sterility and their utilization in baby corn hybrid breeding. *Euphytica*, 216, 146. doi 10.1007/s10681-020-02682-y.
10. Pujar, M., Govindaraj, M., Gangaprasad, S. & Kanatti, A. (2019). Effect of isonuclear-alloplasmic cytoplasmic male sterility on grain yield in pearl millet. *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding*, 79, 141–149. doi 10.31742/IJGPB.79S.1.3.
11. Tyagi, V. & Dhillon, S. K. (2016). Cytoplasmic effect on combining ability for agronomic traits in sunflower under different irrigation regimes. *SABRAO Journal Breeding Genetics*, 48(3), 295–308.
12. Young, J. B. & Virmani, S. S. (1990). Effect of cytoplasm on heterosis and combining ability for agronomic traits in rice (*Oriza sativa* L.). *Euphytica*, 48, 177–188.

13. Elkonin, L. A., Kozhemykin, V. V. & Ishin, A. G. (1997). The use of new types of CMS-inducing cytoplasmas to create precocious sorghum lines with male sterility. *Doklady RASHN* (Russian Agricultural Sciences), 2, 7–9 (in Russ.).
14. *Methods of state variety testing of agricultural crops* (1989). Moscow : Gosagroprom. Vol. 2. (in Russ.).
15. Savchenko, V. K. (1973). *A method for assessing the combinational ability of genetically heterogeneous sets of parental forms. Methods of genetic-selection and genetic experiments*. Minsk : Nauka i tekhnika (in Russ.).
16. Hoffmann, L. & Rooney, W. L. (2013). Cytoplasm Has No Effect on the Yield and Quality of Biomass Sorghum Hybrids. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 2, 129–134. doi 10.4236/JSBS.2013.32018.
17. Elkonin, L., Kibalnik, O., Zavalishina, A. & Gerashchenkov, G. (2018). *Genetic Function of Cytoplasm in Plants with Special Emphasis on Sorghum / In Chloroplasts and Cytoplasm. Structure and Function*. Eds. C. Dejesus, L. Trask. New York: Nova Publ.
18. Kibalnik, O. P. & Elkonin, L. A. (2020). Influence of different types of sterile cytoplasmas (A3, A4, 9E) on the combinational ability of CMS sorghum lines. *Vavilovskii zhurnal genetiki i selektsii* (Vavilov Journal of Genetics and Breeding), 24(6), 549–556. doi 10.18699/VJ20.648 (in Russ.).

Информация об авторах:

О. П. Кибальник – кандидат биологических наук.

Information about authors:

O. P. Kibalnik – Candidate of Biological Sciences.

Статья поступила в редакцию 26.05.2023; одобрена после рецензирования 17.06.2023; принята к публикации 1.07.2023.

The article was submitted 26.05.2023; approved after reviewing 17.06.2023; accepted for publication 1.07.2023.