



Комбинационная способность ЦМС-линий зернового сорго на основе А1, А2, А3, А4, 9Е и М-35-1А типов цитоплазматической мужской стерильности

О.П. Кибальник

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы» «Россорго», Саратов, Россия

Цитоплазматическая мужская стерильность (ЦМС) широко применяется в гетерозисной селекции сельскохозяйственных культур, в том числе сорго. В селекционной работе РосНИИСК «Россорго» используется скороспелый и адаптированный к условиям возделывания в Нижнем Поволжье исходный материал – коллекция ЦМС-линий на основе разных типов стерильных цитоплазм (А1, А2, А3, А4, 9Е и М-35-1А) и сортов зернового сорго. Для создания высокогетерозисных гибридов необходимо выявить родительские формы с высокой комбинационной способностью. Гибриды получены на основе восьми ЦМС-линий: А1 О-Янг 1, А2 КВВ 114, А2 Восторг, А2 Тамара, А3 Фетерита 14, А4 КР 70, М-35-1А Пищевое 614, 9Е Пищевое 614. В качестве опылителей (тестеров) в скрещиваниях включены семь сортов: Меркурий, Огонек, Аванс, Топаз, Волжское 615, Пищевое 35, Волжское 4. Испытания проведены на опытном поле РосНИИСК «Россорго» в 2015–2016 гг. Метеорологические условия в период проведения исследований различались по количеству осадков и сумме активных температур. Комбинационную способность (КС) исходного материала определяли по методу топкросса. Установлено, что у сорго проявление признаков (высота растений, параметры соцветий, масса зерна с одной метелки и 1000 зерен, урожайность) контролируют гены с аддитивным эффектом. Для дальнейшей селекции на гетерозис выделены ЦМС-линии (А1 О-Янг 1, А3 Фетерита 14 и А4 КР 70), у которых высокие эффекты общей комбинационной способности по основным селекционным признакам отличаются стабильностью по годам. Высокой КС также характеризуются сорта Волжское 4 (по высоте растений, массе зерна с одной метелки и урожайности), Аванс и Топаз (по массе 1000 зерен и урожайности). Для конкурсного сортоиспытания выявлены перспективные гибриды F₁ сорго с высокими эффектами специфической комбинационной способности по урожайности и массе 1000 зерен. Предложены гибриды для создания синтетических сортов-популяций.

Ключевые слова: сорго; гибриды F₁; цитоплазматическая мужская стерильность; типы ЦМС; комбинационная способность; селекционно-ценные признаки.

КАК ЦИТИРОВАТЬ ЭТУ СТАТЬЮ:

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):651-656. DOI 10.18699/VJ17.282

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Kibalnik O.P. Combining 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 Selekcii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2017;21(6):651-656. DOI 10.18699/VJ17.282 (in Russian)

Combining ability of CMS-lines of grain sorghum based on A1, A2, A3, A4, 9E and M-35-1A types of cytoplasmic male sterility

O.P. Kibalnik

Russian Research and Project-Technologic Institute for Sorghum and Maize "Rossorgo", Saratov, Russia

Cytoplasmic male sterility (CMS) is widely used in heterosis breeding of crops, including sorghum. In breeding work, "Rossorgo" uses early maturing source material adapted to the conditions of cultivation in the Lower Volga region, a collection CMS-lines with different types of sterile cytoplasm (A1, A2, A3, A4, 9E, M-35-1A) and varieties of grain sorghum. To create heterosis hybrids, it is required to identify the parental form with a high combining ability. Hybrids were derived from CMS-lines: A1 O-Yang 1, A2 KVV 114, A2 Vostorg, A2 Tamara, A3 Feterita 14, A4 KP 70, M-35-1A and 9E Pischevov 614. The pollinators (testers) to crossing included varieties of grain sorghum: Mercury, Ogonek, Avans, Topaz, Volzhskoe 615, Pischevov 35, Volzhskoe 4. The tests were conducted on the experimental field of "Rossorgo" in 2015–2016. Meteorological conditions during the studies differed in the amount of precipitation and the sum of active temperatures. Combining ability (CA) of the starting material was determined by the method of topcross. It was found that the manifestation of traits (plant height, parameters of the panicle, the weight of grains in one panicle and 1000 grains, yield) in sorghum is controlled by genes with additive effect. For further breeding for heterosis, CMS-lines (A1 O-Yang 1, A3 Feterita 14 and A4 KP 70) were selected with strong high effects of GCA on the main breeding grounds stable for years. High CA also characterized varieties Volzhskoe 4 (height of plant, weight of grains in one panicle and yield), Avans and Topaz (mass of 1000 grains and yield). For competitive variety trials, promising F₁ hybrids of sorghum with high SCA effects for yield and weight of 1000 grains were identified. Hybrids to create synthetic varieties-populations were proposed.

Key words: sorghum; hybrids F₁; cytoplasmic male sterility; types of CMS; combining ability; breeding valuable traits.

Зерновое сорго (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) является одной из наиболее засухоустойчивых и высокоурожайных сельскохозяйственных культур в мировом земледелии и возделывается в регионах с острозасушливым климатом. По общей площади посевов среди зерновых культур сорго занимает пятое место после пшеницы, риса, кукурузы и ячменя (Hundekar et al., 2014; Mohammed et al., 2015). В России зерновое сорго выращивается в основном для производства зернофуража и моно корма (Алабушев и др., 2003; Ковтунова, Ковтунов, 2016); возможно также применение его в пищевой и перерабатывающей промышленности (Ковтунов, Горпиниченко, 2011; Никитин и др., 2016). Для дальнейшего распространения этой культуры селекционерам следует создавать скороспелые, адаптированные сорта и гибриды, обеспечивающие высокую урожайность в условиях конкретной микрозоны возделывания.

В настоящее время селекционная работа по созданию гибридов сорго основана на включении в скрещивания материнской формы – линий с цитоплазматической мужской стерильностью и отцовской – восстановителей фертильности (сортов или линий). В связи с этим необходимый этап в селекции на гетерозис – изучение общей (ОКС) и специфической (СКС) комбинационной способности исходного материала (Кибальник и др., 2014; Justin et al., 2015). Известно, что ОКС определяется действием аддитивных генов, а СКС – доминантных и эпистатических (Kumar et al., 2013; Жужукин и др., 2016; Хотылева и др., 2016). Родительские формы с высокими эффектами ОКС являются источниками селекционно-ценных признаков и более приспособлены к условиям выращивания (Fasahat et al., 2016). Поэтому результаты оценки комбинационной способности позволяют более эффективно применять их в селекционных программах скрещиваний и способствуют выявлению гибридов, превосходящих родительские формы по основным хозяйственным признакам (Kenga et al., 2006; Reddy et al., 2007; Беседа и др., 2009).

В селекции сорго на гетерозис в основном используются стерильные линии с высокой комбинационной способностью, полученные на основе цитоплазмы A1 (Mahdy et al., 2011; More et al., 2014; Patil, Kute, 2015). Для повышения адаптивного потенциала гибридов необходимо расширение генетического разнообразия исходного материала, в том числе включение в качестве компонентов скрещиваний стерильных линий с разными типами ЦМС. У сорго известно большое количество ЦМС-индуцирующих цитоплазм – A1, A2, A3, A4, A5, A6, 9E, M-35-1A и др. (Reddy et al., 2005). На основании этого селекционеры включают в схемы скрещиваний ЦМС-линии с новыми типами стерильности – A2 и A3 (Mohammed, 2009; Reddy et al., 2009; Aruna et al., 2013; Гаршин и др., 2014), A4, 9E и M-35-1A (Кибальник, Эльконин, 2014; Кибальник, 2016). Цель данной работы заключалась в оценке комбинационной способности новых стерильных линий (с типами ЦМС – A1, A2, A3, A4, 9E, M-35-1A) и сортов сорго по селекционно-ценным признакам.

Материалы и методы

Гибриды F₁ получены на основе ЦМС-линий: BC₇ – A1 О-Янг 1; BC₁₅ – A2 KBB 114; BC₁₂ – A2 Восторг;

BC₇ – A2 Тамара; BC₁₂ – A3 Фетерита 14; BC₁₂ – A4 КП 70; BC₁₂ – M-35-1A Пищевое 614 (П-614); BC₁₂ – 9E Пищевое 614 (Elkonin et al., 1995, 1997; Эльконин и др., 1997). В качестве опылителей (тестеров) использовали сорта зернового сорго (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) селекции РосНИИСК «Россорго»: Меркурий, Огонек, Аванс, Топаз, Волжское 615, Пищевое 35, Волжское 4. Все участвующие в гибридизации тестеры до начала опыления ежегодно поддерживались в условиях изоляции.

Гибриды F₁ выращивали на опытном поле РосНИИСК «Россорго» в 2015–2016 гг. Площадь делянки – 7,7 м². Размещение делянок рендомизированное (Доспехов, 2011). Повторность в опыте трехкратная. Густоту стояния растений устанавливали вручную (100 тыс. раст./га). Оценку селекционно-ценных признаков гибридов F₁ и учеты проводили по общепринятой методике (Методика государственного сортоиспытания..., 1989).

Метеорологические условия за период испытания гибридов F₁ сорго различались. В 2015 г. выпало 106,2 мм осадков, а сумма активных температур составила 2613,1 °С. Погодные условия 2016 г. характеризовались большим количеством осадков (178,3 мм) и суммой активных температур (2805,0 °С).

Комбинационную способность компонентов скрещиваний определяли по методу топкросса (Савченко, 1973). Статистическая обработка экспериментальных результатов исследований выполнена методом однофакторного дисперсионного анализа с помощью программы AGROS 2.09.

Результаты и обсуждение

Общая комбинационная способность

Материнские линии. Высокие эффекты ОКС по длине и ширине соцветия, массе зерна с одной метелки отмечены у стерильной линии A1 О-Янг 1. ЦМС-линия A2 KBB 114 характеризуется высокой ОКС по урожайности, ширине соцветия и средней – по высоте растений. Гибриды, полученные с использованием линии A3 Фетерита 14, отличались высокорослостью и наибольшей урожайностью зерна. Стерильная линия A4 КП 70 обладает высокой ОКС по массе 1000 зерен (3,91–4,32) и средней – по массе зерна с одной метелки (0,41–0,99). Материнская линия A2 Восторг выделялась средними значениями ОКС по высоте растений (3,12–11,44) и ширине соцветия (0,15–0,21). Низкая ОКС выявлена у линий A2 Тамара, M-35-1A Пищевое 614 и 9E Пищевое 614 (табл. 1).

Показатели высоких эффектов ОКС ЦМС-линий A1 О-Янг 1, A3 Фетерита 14 и A4 КП 70 отличаются стабильностью по годам. Вместе с тем значительная реакция стерильных линий на сложившиеся метеоусловия по ОКС длины соцветия отмечена у A2 KBB 114, A2 Восторг, 9E Пищевое 614; ширины соцветия – 9E Пищевое 614; массы зерна с одной метелки – A2 Восторг; массы 1000 зерен – M-35-1A Пищевое 614 и урожайности зерна – A2 Восторг.

Тестеры. Среди сортов высокая ОКС по высоте растений, массе зерна с одной метелки и урожайности выявлена у Волжского 4 (см. табл. 1). Сорта Топаз и Аванс характеризуются высокими эффектами ОКС по

Table 1. Effects of the general combination ability of parents on commercially valuable traits in crosses

Sterile lines and varieties	Plant height		Inflorescence length		Inflorescence width		Grain weight per panicle		1000 grain weight		Grain yield	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
CMS lines												
A1 O-Yang 1	-2.64	7.70	4.66	5.12	1.88	2.07	5.04	10.05	-2.27	-1.95	-0.83	1.48
A2 KVV 114	7.86	1.96	0.30	-0.37	4.05	1.27	-0.28	-2.51	-3.60	-2.93	0.94	0.04
A2 Tamara	-	-15.83	-	-0.74	-	1.73	-	-1.59	-	2.51	-	-0.43
A2 Vostorg	3.12	11.44	-1.25	1.26	0.15	0.21	3.79	-5.01	-0.14	-1.58	1.28	-0.46
A3 Feterita14	22.80	22.67	-3.71	-2.51	-1.57	-0.02	-1.87	2.63	3.53	2.59	0.27	1.04
A4 KP 70	-2.99	-1.98	-0.56	2.39	-4.82	-0.69	0.41	0.99	3.91	4.32	0.16	-0.55
M-35-1A Pishchevov 614	-12.90	-12.98	-0.40	-2.67	-2.04	-2.26	-5.70	-1.93	0.30	-1.10	-1.33	-0.63
9E Pishchevov 614	-15.20	-12.99	0.98	-2.46	2.34	-2.29	-1.39	-2.61	-1.73	-1.85	-0.48	-0.48
F _{obs}	213.4*	660.9*	38.5*	108.6*	65.0*	121.3*	56.4*	52.6*	190.8*	45.7*	114.6*	48.8*
Testers												
Merkuriy	-8.24	-4.58	-0.92	3.22	-0.48	1.48	-6.72	-2.90	-0.80	-0.73	-0.87	0.40
Ogonek	-12.32	-5.18	-2.07	-0.69	0.02	0.11	-9.03	-6.98	-0.64	-1.63	-1.03	-0.62
Avans	-3.82	-0.19	0.79	-0.95	-1.85	-0.01	1.00	2.96	4.15	3.14	0.50	0.28
Topaz	-2.33	0.26	-3.22	0.62	-3.73	-0.31	3.24	0.11	2.32	1.26	0.10	0.48
Volzhskoe 615	7.12	-3.23	-1.18	0.56	1.43	0.15	0.86	5.35	-1.47	0.26	0.09	-0.13
Pishchevov 35	14.95	4.06	2.04	-2.32	1.42	-0.80	1.79	-1.09	-2.13	-1.60	0.34	-0.53
Volzhskoe 4	4.64	8.86	4.56	-0.44	3.20	-0.60	8.84	2.55	-1.40	-0.70	0.86	0.12
F _{obs}	113.2*	104.0*	42.4*	48.7*	10.31*	27.2*	159.3*	46.7*	126.0*	21.1*	64.1*	16.8*

* $p \leq 0.05$.

массе 1000 зерен (1.26–2.32 и 3.14–4.15 соответственно) и урожайности (0.10–0.48 и 0.28–0.50 соответственно). Наибольшие значения ОКС по ширине соцветия и массе зерна с одной метелки отмечены у сорта Волжское 615. У сортов Меркурий и Огонек установлены отрицательные значения эффектов ОКС по высоте растений и элементам структуры урожайности зерна.

Показатели эффектов ОКС отцовских форм также изменялись в зависимости от сложившихся погодных условий по признакам: высота растений (Топаз, Волжское 615); длина соцветия (у всех сортов, кроме Огонек); масса зерна с одной метелки (Пищевое 35), масса 1000 зерен (Волжское 615) и урожайность зерна (Меркурий, Волжское 615, Пищевое 35).

Специфическая комбинационная способность

Материнские линии. Анализ дисперсий СКС стерильных линий показал, что высокие значения по высоте растений и ширине соцветий установлены у А2 КВВ 114; по массе зерна с одной метелки и урожайности – А2 Восторг; по ширине соцветия и урожайности – А3 Фетерита 14 (табл. 2). Стерильная линия А4 КП 70 характеризуется высокой СКС по массе 1000 зерен (13.94–36.12) и средней – по всем селекционно-ценным признакам.

Выявлено существенное изменение показателей дисперсии СКС у компонентов скрещиваний в зависимости от метеоусловий года исследований. Высокая дисперсия СКС

в отдельные сезоны отмечена у ЦМС-линий: А1 О-Янг 1 (по высоте растений, массе зерна с одной метелки и урожайности), А2 КВВ 114 (по массе 1000 зерен и урожайности зерна), А2 Восторг (по высоте растений); а стабильные показатели – А3 Фетерита 14 (по высоте растений, длине соцветий, массе зерна с одной метелки и урожайности), А2 Восторг (по урожайности зерна – 1.28–1.79), М-35-1А Пищевое 614 (по массе 1000 зерен – 8.89–9.77), 9Е Пищевое 614 (по параметрам соцветий, массе зерна с одной метелки и 1000 зерен).

Тестеры. Высокой специфической комбинационной способностью отличаются сорта: Волжское 4 (по всем признакам, кроме длины соцветия), Меркурий и Аванс (по урожайности – 0.69–2.34), Огонек (по ширине соцветия – 3.49–14.95), Топаз (по длине соцветия и урожайности зерна), Пищевое 35 (по высоте растений – 79.16–147.89). Сорт Волжское 615 характеризуется средними значениями дисперсий СКС по элементам структуры урожайности, параметрам соцветия и низкими – по высоте растений. Слабое варьирование значений дисперсий СКС установлено у сортов: Аванс и Волжское 4 (по высоте растений), Меркурий (по массе 1000 зерен), Топаз (по высоте растений и урожайности зерна), Огонек (по массе зерна с одной метелки и урожайности зерна), Пищевое 35 (по массе зерна с одной метелки и 1000 зерен, урожайности зерна).

Для выявления перспективных гибридов сорго используют оценку эффектов СКС (табл. 3). Среди изученных

Table 2. Variance of the special combining ability for major commercially valuable traits in parental sorghum accessions

Sterile lines and varieties	Plant height		Inflorescence length		Inflorescence width		Grain weight per panicle		1000 grain weight		Grain yield	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
CMS lines												
A1 O-Yang 1	104.47	55.12	6.41	5.24	14.43	3.16	271.62	22.00	6.61	7.97	0.24	1.82
A2 KVV 114	129.25	234.44	8.50	6.63	11.03	5.45	76.52	14.36	10.02	1.65	1.31	0.50
A2 Tamara	–	33.44	–	19.68	–	2.23	–	24.78	–	18.30	–	0.22
A2 Vostorg	36.06	179.13	3.47	2.66	4.35	0.76	94.97	77.51	7.42	4.28	1.28	1.79
A3 Feterita 14	47.41	44.70	12.07	10.15	10.70	5.52	44.11	42.34	6.98	9.48	1.84	1.68
A4 KP 70	24.95	85.68	54.27	6.82	12.02	0.64	6.08	44.75	13.94	36.12	0.26	1.50
M-35-1A Pishchevov 614	70.30	36.16	17.44	6.32	6.38	1.72	14.80	73.75	9.77	8.89	0.61	0.29
9E Pishchevov 614	89.33	46.07	3.46	4.20	2.60	1.33	25.89	27.86	5.51	4.42	1.41	0.42
Testers												
Merkuriy	40.38	62.83	11.27	6.13	4.04	3.69	10.19	61.67	10.36	11.53	0.69	2.34
Ogonek	54.64	82.89	9.09	10.41	14.95	3.49	24.56	26.61	10.11	4.14	0.94	0.87
Avans	70.80	68.33	7.13	13.86	8.11	1.12	78.64	23.72	10.43	2.20	1.92	0.29
Topaz	73.05	74.24	50.85	6.92	4.59	2.01	57.48	16.98	4.99	12.78	1.20	1.36
Volzhskoe 615	44.49	38.78	10.45	8.58	11.35	2.04	24.83	77.04	6.54	11.60	0.17	1.02
Pishchevov 35	79.16	147.89	4.26	2.83	3.84	2.28	23.05	24.80	9.46	10.56	0.10	0.25
Volzhskoe 4	139.25	137.68	12.57	4.16	14.64	3.21	315.25	49.77	8.37	25.28	1.92	0.89
F _{obs} (in parental accessions)	15.1*	51.8*	15.0*	17.7*	10.3*	18.1*	55.1*	16.0*	33.4*	11.5*	21.4*	12.4*

* $p \leq 0.05$.**Table 3.** Effects of the special combination ability of best sorghum hybrids for morphological traits and yield components

Cross combinations	Plant height		Inflorescence length		Inflorescence width		Grain weight per panicle		1000 grain weight		Grain yield	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
A2 KVV 114/Volzhskoe 4	22.6	22.36	–2.26	3.38	–1.18	2.76	–8.04	–4.36	1.32	1.16	–0.40	0.65
A2 Vostorg/Pishchevov 35	10.1	23.17	–0.01	–1.07	–0.21	0.42	6.33	–9.48	0.27	–0.66	0.31	–0.72
A1 O-Yang 1/Avans	14.0	11.68	–2.01	3.00	0.05	–0.22	–10.2	7.07	0.03	1.86	–0.48	0.41
A3 Feterita 14/Topaz	0.61	7.44	4.25	1.95	1.68	–0.32	11.8	–5.03	–0.60	–0.38	0.73	–0.93
A4 KP 70/Volzhskoe 615	5.88	5.80	6.15	1.40	6.14	–0.22	1.74	–0.57	–2.32	–5.51	0.01	1.06
A3 Feterita 14/Ogonek	1.96	3.09	3.53	2.48	5.49	2.93	–5.77	4.19	4.52	0.83	–1.38	1.32
A1 O-Yang 1/Volzhskoe 4	–12.9	–9.58	4.24	–2.01	6.98	–2.63	36.7	3.59	–1.25	0.33	1.05	–1.57
A2 KVV 114/Avans	–2.41	5.52	2.16	2.40	5.88	1.47	15.1	3.46	4.56	–1.05	2.40	–0.06
A4 KP 70/Volzhskoe 4	6.63	–4.29	4.97	1.11	–3.03	0.33	–2.34	11.79	5.09	9.62	–0.06	1.27
A4 KP 70/Merkuriy	–1.50	5.85	1.67	–1.85	0.43	1.14	0.93	–9.47	3.79	6.32	0.71	–2.45
A1 O-Yang 1/Volzhskoe 615	7.08	–8.38	0.53	–0.02	–3.19	2.40	–9.49	–5.86	5.31	4.68	–0.17	0.52
A2 Vostorg/Ogonek	–3.65	–0.17	1.30	1.49	–2.81	0.29	–6.10	4.27	4.55	4.03	–1.03	1.30
A3 Feterita 14/Volzhskoe 4	0.33	–8.25	–3.47	–2.76	–3.91	–2.03	4.24	3.94	–3.62	–5.41	2.48	0.31
A1 O-Yang 1/Topaz	–8.78	–1.78	1.11	3.41	–3.31	–0.02	–1.77	–1.27	0.16	–2.36	–0.17	2.57
A2 Vostorg/Merkuriy	4.98	–12.3	–0.76	2.57	1.18	0.73	2.25	15.26	0.45	0.99	–0.54	2.45

Table 4. Mean square deviations of the general and specific combination abilities for commercially valuable traits

Trait	Deviations of msGCA and msSCA		msGCA : msSCA ratio	
	2015	2016	2015	2016
CMS lines				
Plant height	1177.8/83.6	1300.6/102.1	14.1	12.7
Inflorescence length	45.1/17.6	53.8/8.8	2.6	6.1
Inflorescence width	64.6/10.2	19.8/2.9	6.3	6.8
Grain weight per panicle	91.1/89.0	153.6/46.7	1.02	3.3
1000 grain weight	57.3/10.0	51.4/13.0	5.7	3.9
Grain yield	6.2/1.1	4.6/1.1	5.6	4.2
Testers				
Plant height	625.1/83.6	204.8/102.1	7.5	2.0
Inflorescence length	49.7/17.6	24.1/8.8	2.8	2.7
Inflorescence width	37.3/10.2	4.4/2.9	3.7	1.5
Grain weight per panicle	257.4/89.0	136.5/46.7	2.9	2.9
1000 grain weight	37.8/10.0	23.7/13.0	3.7	1.8
Grain yield	3.4/1.1	1.5/1.1	3.1	1.4

Columns 2 and 3: numerator, msGCA; denominator, msSCA.

комбинаций скрещиваний отмечено 15 гибридов F_1 с высокими эффектами ККС: по высоте растений (А2 КВВ 114/Волжское 4, А2 Восторг/Пищевое 35, А1 О-Янг 1/Аванс); длине соцветий (А3 Фетерита 14/Топаз); ширине соцветий (А3 Фетерита 14/Огонек); массе зерна с одной метелки (А1 О-Янг 1/Волжское 4, А2 КВВ 114/Аванс); массе 1000 зерен (А1 О-Янг 1/Волжское 615, А4 КП 70/Волжское 4, А4 КП 70/Меркурий); урожайности зерна (А1 О-Янг 1/Топаз, А2 Восторг/Меркурий, А2 КВВ 114/Аванс, А3 Фетерита 14/Волжское 4).

В дальнейшем конкурсное сортоиспытание рекомендуется включить низкорослые и среднерослые гибриды (А1 О-Янг 1/Волжское 615, А2 Восторг/Меркурий, А2 КВВ 114/Аванс, А4 КП 70/Волжское 4), характеризующиеся крупным зерном и высокой урожайностью. Остальные 11 гибридов F_1 следует использовать в селекционных программах по созданию синтетических сортов-популяций с целью улучшения морфологических признаков и элементов структуры урожая.

Генетический контроль селекционно-ценных признаков

Отношение среднеквадратических отклонений общей и специфической комбинационной способности указывает на преобладание аддитивных эффектов над неаддитивными ($ms_{OKC}/ms_{CKC} > 1$) в генетическом контроле всех изученных признаков: материнских линий 1.8–13.3, сортов (тестеров) – 2.3–4.5. Высокие показатели отношения среднеквадратических отклонений ОКС и ККС отмечены по высоте растений. Показатели отношения ms_{OKC}/ms_{CKC} по признакам у материнских (длина соцветий, масса зерна с одной метелки и 1000 зерен) и отцовских (высота растений, ширина соцветия, масса 1000 зерен и урожайность) форм изменялись по годам (табл. 4). При этом по высоте растений, ширине соцветий и урожайности зерна

у ЦМС-линий, а также по длине соцветия и массе зерна с одной метелки у сортов величина отношения ms_{OKC}/ms_{CKC} оставалась относительно стабильной.

Таким образом, оценка комбинационной способности ЦМС-линий на основе разных типов стерильности и сортов зернового сорго позволила выделить перспективные комбинации скрещиваний для дальнейшего конкурсного сортоиспытания, а также создания синтетических сортов-популяций. Для получения высокопродуктивных гибридов с улучшенным комплексом селекционно-ценных признаков в программу скрещиваний рекомендуется включать в качестве материнских форм – А1 О-Янг 1, А2 КВВ 114, А3 Фетерита 14 и А4 КП 70; отцовских – Волжское 4, Аванс и Топаз. Установлено, что в генетическом контроле признаков сорго (высота растений, параметры соцветий, масса зерна с одной метелки и 1000 зерен, урожайность зерна) участвуют гены с аддитивным эффектом.

Acknowledgments

This work was supported by a state budgeted project (2015–2016).

The author is grateful to Dr. Zhuzhukin for help in the manuscript preparation.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

References

- Alabushev A.V., Anipenko L.N., Gurskiy N.G., Kolomiets N.Ya., Kostylev P.I., Mangush P.A., Alabusheva O.I. Sorgho (seleksiya, semenovodstvo, tekhnologiya, ekonomika) [Sorghum: breeding, seed production, technology, and economy]. Rostov-on-Don: Kniga Publ., 2003. (in Russian)
- Aruna C., Shrotria P.K., Pahujia S.K., Umakanth A.V., Venkatesh Bhat B., Vishala Devender A., Patil J.V. Fodder yield and quality in

- forage sorghum: scope for improvement through diverse male sterile cytoplasms. *Crop Pasture Sci.* 2013;36(12):1114-1123.
- Beseda N.A., Kostylev P.I., Gorpichenko S.I. The combining ability of grain sorghum in the system of diallel crossings. *Zernovoe khozjaistvo Rossii = Grain Economy of Russia.* 2009;1:14-16. (in Russian)
- Dospekhov B.A. Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezultatov isledovaniy) [Methods of Field Experiments (with Fundamentals of Statistical Processing of Study Results)]. Moscow: Al'yans Publ., 2011. (in Russian)
- Elkonin L.A., Kozhemyakin V.V., Ishin A.G. Nuclear-cytoplasmic interactions in fertility restoration in sorghum: alternative CMS-inducing cytoplasms. *Int. Sorghum Millet Newslett.* 1995;36:75-76.
- Elkonin L.A., Kozhemyakin V.V., Ishin A.G. Comparative analysis of restoration of male-sterile (CMS)-inducing cytoplasms A3 and M35-1. *Int. Sorghum Millet Newslett.* 1997;38:29-30.
- Elkonin L.A., Kozhemyakin V.V., Ishin A.G. Use of new types of CMS-inducing cytoplasm for the creation of early ripening sorghum lines with male sterility. *Doklady Rossiyskoy Akademii Selskokhozyaystvennykh Nauk = Proceedings of the Russian Academy of Agricultural Sciences.* 1997;2:7-9. (in Russian)
- Fasahat P., Rajabi A., Rad J.M., Derera J. Principles and utilization of combining ability in plant breeding. *Biom. Biostat. Int. J.* 2016;4(1): 1-24. DOI 10.15406/bbij.2016.04.00085.
- Garshin A.Y., Zhuzhukin V.I., Semin D.S. Determination of the combining ability of sweet sorghum genotypes for grain quality in test crosses. *Kukuruza i sorgo = Maize and Sorghum.* 2014;1:20-23. (in Russian)
- Hundekar R., Kamatar M.Y., Brunda S.M., Pattar V. Combining ability analysis for yield and grain mold resistance in kharif sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. *Int. J. Plant Sci.* 2014;9(1):252-256.
- Justin R., Were B., Mgonja M., Santosh D., Abhishek R., Emmarold M., Agustino O., Samuel G. Combining ability of some sorghum lines for dry lands and sub-humid environments of East Africa. *Afr. J. Agric. Res.* 2015;10(19):2048-2060. DOI 10.5897/AJAR2014.8519.
- Kenga R., Tenkouano A., Gupta S.C., Alabi S.O. Genetic and phenotypic association between yield components in hybrid sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] population. *Euphytica.* 2006;150(3): 319-326.
- Khotyleva L.V., Kilchevsky A.V., Shapturenko M.N. Theoretical aspect of heterosis. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selektzii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding.* 2016;20(4):482-492. DOI 10.18699/VJ16.174. (in Russian)
- Kibalnik O.P. The combinational ability of grain sorghum CMS lines for yield components. *Kukuruza i sorgo = Maize and Sorghum.* 2016;3:23-27. (in Russian)
- Kibalnik O.P., Elkonin L.A. The combining ability of new CMS lines and varieties of grain sorghum. *Kukuruza i sorgo = Maize and Sorghum.* 2014;2:25-28. (in Russian)
- Kibalnik O.P., Elkonin L.A., Bychkova V.V. The combining ability of CMS lines of sorghum for fresh yield. *Zernovoe khozjaistvo Rossii = Grain Economy of Russia.* 2014;6:5-8. (in Russian)
- Kovtunov V.V., Gorpichenko S.I. Major applications of grain sorghum. *Zernovoe khozjaistvo Rossii = Grain Economy of Russia.* 2011;6:28-32. (in Russian)
- Kovtunova N.A., Kovtunov V.V. The use of sorghum and the main areas of breeding work at the Kalinenko All-Russia Research Institute for Grain Crops. *Tavrisheskiy vestnik agrarnoy nauki = Taurida Herald of the Agrarian Sciences.* 2016;3(7):60-70. (in Russian)
- Kumar S., Kumar V., Chand P., Kumar N., Shrotria P.K. Genetic parameters for hydrocyanic acid content in forage sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. *Int. J. Biotechnol. Bioeng. Res.* 2013;4(4): 395-400.
- Mahdy E.E., Ali M.A., Mahmoud A.M. The effect of environment on combining ability and heterosis in grain sorghum [*Sorghum bicolor* L. Moench]. *Asian J. Crop Sci.* 2011;3(1):1-15. DOI 10.3923/ajcs.2011.1.15.
- Metodika gosudarstvennogo sortoispytaniya selskokhozyaystvennykh kultur. Vyp. 2 [Methods of state variety testing of crops. Issue 2]. Moscow, 1989. (in Russian)
- Mohammed M.I. Line \times tester analysis across locations and year in Sudanese \times exotic lines of forage sorghum. *J. Plant Breed. Crop. Sci.* 2009;1(9):311-319.
- Mohammed R., Are R., Bhavanasi R., Munghate R.S., Kishor K.P.B., Sharma H.C. Quantitative genetic analysis of agronomic and morphological traits in sorghum, *Sorghum bicolor*. *Front. Plant Sci.* 2015;6:1-17. DOI 10.3389/fpls.2015.00945.
- More A., Kalpande H.V., Aundhekar R.L., Chavan S.K., Patil V.S., Jangampalli S.S. Heterosis and line \times tester analysis of combining ability in kharif sorghum with special reference to grain mold [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. *Agrotechnol.* 2014;2:4. DOI 10.4172/2168-9881.S1.012.
- Nikitin I.A., Svechnikov A.Yu., Zots A.D., Alfimova A.D., Tatraev D.A., Miriev M.O. Analysis of the application of sorghum and its derivatives in bakery and pastry production. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike [Technology sciences: from theory to practice].* Novosibirsk: SibAK Publ., 2016;12(30):123-129. (in Russian)
- Patil V.R., Kute N.S. Combining ability studies in grain sorghum. *J. Global Biosci.* 2015;4(1):1902-1909.
- Reddy B.V.S., Ramesh S., Ortiz R. Genetic and cytoplasmic-nuclear male sterility in Sorghum. *Plant Breeding Reviews.* Ed. J. Janik. Hoboken, New Jersey: Wiley & Sons, Inc. 2005;25:139-169.
- Reddy B.V.S., Ramesh S., Reddy P.S., Kumar A.A. Male-sterility inducing cytoplasmic on combining ability in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. *Ind. J. Genet.* 2009;69(3):199-204.
- Reddy B.V.S., Ramesh S., Reddy P.S., Ramaiah B. Combining ability and heterosis as influenced by male-sterility inducing cytoplasms in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. *Euphytica.* 2007;154(1): 153-164. DOI 10.1007/s10681-006-9281-6.
- Savchenko V.K. Metod otsenki kombinatsionnoi sposobnosti geneticheskii raznokachestvennykh naborov roditelskikh form [A method for evaluating the combining ability of genetically different sets of parental forms]. *Metodiki genetiko-selekcionnogo i geneticheskogo eksperimentov [Methods of genetic-breeding and genetic experiments].* Minsk: Nauka i Tekhnika Publ., 1973;48-77. (in Russian)
- Zhuzhukin V.I., Semin D.S., Garshin A.Y. Study of the combining ability of forage sorghum for economically valuable traits in test crosses. *Kukuruza i sorgo = Maize and Sorghum.* 2016;1:11-13. (in Russian)