

ВЛИЯНИЕ ТИПА СТЕРИЛЬНОЙ ЦИТОПЛАЗМЫ
НА СЕЛЕКЦИОННО-ЦЕННЫЕ ПРИЗНАКИ ГИБРИДОВ F1 СОРГО
В РАЗЛИЧНЫХ ПО ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТИ УСЛОВИЯХ

О.П. КИБАЛЬНИК

(ФГБНУ «Российский научно-исследовательский
и проектно-технологический институт сорго и кукурузы»)

Некоторыми исследователями у сорго обнаружено влияние стерильной цитоплазмы на проявление биологических и селекционно-ценных признаков. При этом одни авторы обнаруживают влияние стерильной цитоплазмы, другие описывают отсутствие различий между гибридами F1, полученными на основе ЦМС-линий с одним и тем же ядерным геномом и различающимися только типом стерильной цитоплазмы. В этой связи целью исследований являлось определение эффекта стерильных цитоплазм A1, A2, A3, A4, A5, A6 и метеорологических условий выращивания гибридов F1 зернового сорго на основные селекционно-ценные признаки. В данных исследованиях гибриды F1 получены на основе ЦМС-линий с геномом Карлика 4в и 6 типами стерильных цитоплазм, а в качестве опылителя использовали линию Восторг. Исследования проводились в течение 2016–2018 гг., различающихся по гидротермическому режиму периодов вегетации растений (ГТК = 0,51–1,01). В результате эксперимента впервые установлено: увеличение высоты растений при созревании у гибрида A5 Карлик 4в/Восторг (123,3 см) в сравнении с гибридами на цитоплазмах A1, A2, A3, A4, A6 (118,0 см); уменьшение площади флагового листа у гибрида A3 Карлик 4в/Восторг (104,4 см²) в сравнении с гибридами на цитоплазмах A2, A4, A5 и A6 (130,3–136,3 см²). В среднем за период испытаний гибриды на цитоплазмах A1 и A5 формировали более высокую урожайность биомассы (18,53–18,57 т/га) в сравнении с гибридами на цитоплазмах A4 и A6 (13,76–15,91 т/га), однако различия оказались незначимыми. При этом вклад факторов «Тип ЦМС» в общую изменчивость селекционных признаков составил от 1,4 до 14,0%, «Метеорологические условия года» – 24,0–58,9%. В селекции гибридов сорго с использованием генетически различных типов стерильных цитоплазм по комплексу селекционных признаков в скрещивания целесообразно включать ЦМС-линию на цитоплазме A5.

Ключевые слова: сорго, гибриды F1, ЦМС-линии, типы стерильных цитоплазм, селекционные признаки, урожайность.

Введение

Растения сорго являются засухоустойчивыми и способны формировать высокие урожаи зерна и надземной биомассы в условиях с низкой влагообеспеченностью [5, 13]. Многие исследователи отмечают, что сорго может приспосабливаться к разнообразным агрономическим и экологическим условиям и является нетребовательным к почвам [3–4, 18–20].

В последнее время в селекции сорговых культур приоритетным направлением повышения урожайности становится выведение новых гетерозисных гибридов [14]. Промышленное получение семян гибридов первого поколения основано на использовании цитоплазматической мужской стерильности (ЦМС), которая была открыта у многих сельскохозяйственных культур (кукуруза, подсолнечник, африканское просо, рис, горчица и др.), в том числе сорго [17]. Впервые у сорго ЦМС обнаружена в 1954 г. Дж.К. Стивенсом и Р.Ф. Холландом, и ее обозначили как А1 (*milo*) [9]. В дальнейшем, на основе типа стерильной цитоплазмы А1, выведены ЦМС-линии, широко включаемые в селекционный процесс по созданию продуктивных гибридов сорго. В настоящее время у сорго выделено большое количество генетически различных стерильных цитоплазм [21], причем обнаружен маркер, позволяющий идентифицировать генетическую чистоту ЦМС-линий на основе цитоплазмы А1 [20].

Известно, что многие хозяйственно-ценные признаки растений являются полигенными и формируются в результате взаимодействия продуктов ядерных генов между собой и с факторами внешней среды, поэтому цитоплазматическое окружение может оказывать значительное влияние на проявление этих признаков. В этой связи важным этапом в селекции гибридов становится изучение влияния ЦМС-индуцирующих цитоплазм на селекционно-ценные признаки и урожайность [6].

Следует отметить, что в литературе встречаются сведения о цитоплазматическом эффекте у сорго. Однако это достаточно разносторонняя информация: одними исследователями отмечены различия между гибридами на цитоплазмах А1, А2, А3 по продуктивности и качеству биомассы [1], установлено влияние цитоплазмы 9Е на урожайность биомассы, фотосинтетический потенциал и чистую продуктивность фотосинтеза по сравнению с цитоплазмами А3 и А4, цитоплазмы А4 и М35–1А на содержание белка в зерне [11, 12]; другие показывают отсутствие различий между гибридами на цитоплазмах А1, А2, А3 по высоте растений, урожайности биомассы, содержанию сухого вещества [2].

Как показывает анализ данных литературы, сравнение гибридов по селекционно-ценным признакам с использованием более широкого набора ЦМС-индуцирующих цитоплазм не проводилось. Это свидетельствует об актуальности данных исследований, которые позволят расширить информацию по проявлению цитоплазматических эффектов у сорго.

Цель исследований: определение эффекта стерильных цитоплазм А1, А2, А3, А4, А5, А6 и метеорологических условий выращивания гибридов F1 зернового сорго на основные селекционно-ценные признаки.

Материал и методы исследований

Гибриды F1 получены в результате скрещивания изоядерных ЦМС-линий с геном Карлика 4в на основе А1, А2, А3, А4, А5, А6 стерильных цитоплазм с линией Восторг. Данные ЦМС-линии имеют одинаковый ядерный геном, но отличаются друг от друга типом стерильной цитоплазмы, которые различаются по происхождению, генетике восстановления фертильности, морфологии и гистологической структуре пыльников, стадии дегенерации пыльцы, структуре митохондриального и хлоропластного геномов [7]. Созданы они путем серий бэккроссов образца Карлика 4в с ЦМС-линиями, несущими цитоплазмы следующих источников стерильности: А1 (*milo*), А2 (IS12662С), А3 (IS1112С), А4 (IS7920С), А5 (IS1056С), А6 (IS17506С).

В данных исследованиях использовали растения из семей ВС₀. Идентификацию материнских форм ежегодно проводили с помощью цитологического анализа пыльцы

в период цветения соцветий. Гибриды высевали на опытном поле ФГБНУ РосНИИСК «Россорго» в течение 2016–2018 гг. Посев широкорядным способом (междурядье 70 см) проводился в оптимальный для сорго срок – во второй-третьей декадах мая. Повторность в опыте – трехкратная. Размещение делянок площадью 7,7 м² – рендомизированное. Оценка селекционно-ценных признаков (высота растений через 30 дней после всходов и при созревании, площадь наибольшего и флагового листьев, общая кустистость) и учет урожайности биомассы выполнены согласно общепринятой методике [19].

Статистическая обработка экспериментальных данных произведена методом двухфакторного анализа (фактор А – тип ЦМС, фактор В – метеорологические условия года) с помощью программы Агрос 2.09.

Гидротермический коэффициент (ГТК) за период вегетации гибридов первого поколения варьировал от 0,51 до 1,01. В 2016 и 2018 гг. наблюдались засушливые условия возделывания: ГТК = 0,51–0,68 (сумма активных температур – 2696–2702°C, количество осадков – 137,3–184,6 мм), тогда как 2017 г. оказался наиболее влагообеспеченным: ГТК = 1,01 (сумма активных температур – 2475 °С, количество осадков – 248,9 мм).

Результаты и их обсуждение

В результате дисперсионного двухфакторного анализа значений признака «Высота растений через 30 дней после всходов» установлено, что изучаемые гибриды зернового сорго не различались между собой ни в отдельные сезоны выращивания, ни в среднем за 3 года изучения. Значения признака варьировали в интервале 42,3–44,8 см. При этом метеорологические условия года оказали существенное влияние на высоту растений через 30 дней после всходов, что подтверждается наибольшей долей фактора в общей изменчивости признака – 58,9%. Благоприятные условия для начального роста растений складывались в 2016 и 2018 гг.: значение признака составило 42,5–53,9 и 42,2–47,9 см соответственно.

На рисунке 1 представлено среднее значение признака по гибридам за период исследований: в 2017 г. – всего 36,8 см; в 2018 г. – 44,5; в 2016 г. – 48,9 см. В проведенных ранее исследованиях отмечено влияние стерильных цитоплазм А2, А4 и 9Е на данный признак у гибридов F1 с геномом Раннего 7 по сравнению с цитоплазмой А1 в условиях достаточной влагообеспеченности. Более интенсивный рост гибридов наблюдался на цитоплазме 9Е в каждый сезон [15].

В период созревания растения гибридов достигали 114,2–123,3 см в среднем за 3 года. Дисперсионным анализом подтверждено влияние фактора стерильной цитоплазмы на изучаемый признак (доля фактора – 11,0%). Так, гибриды на цитоплазме А5 были выше гибридов на цитоплазмах А1, А2, А3, А4, А6 на 5,3–9,1 см. В условиях 2017 и 2018 гг. также отмечено преимущество цитоплазмы А5, когда увеличение признака составило 7,7–11,1 см. Установлено и значимое влияние среднего фактора (вклад – 58,9%). Наибольшей средней высоты растения гибридов достигали в более влажном 2017 г. (126,1 см), тогда как в засушливые 2016 и 2018 гг. – 110,5–116,7 см (рис. 1). Ранее было выявлено, что условия влагообеспеченности возделывания гибридов F1 зернового сорго на основе типов стерильных цитоплазм А1, А2, А4 и 9Е оказывают влияние на проявление цитоплазматических эффектов на высоту растений в период созревания [15].

Сорго – растение с С4-типом фотосинтеза [10]. В литературе представлены сведения о высокой корреляционной взаимосвязи урожайности биомассы и скорости фотосинтеза [8]. Кроме того, учитывая роль ядерно-цитоплазматических

взаимодействий в генетическом контроле фотосинтеза, можно предположить выявление различий между гибридами с разными типами стерильных цитоплазм [12]. Поэтому в данной работе уделено внимание линейным размерам листьев, в том числе флаговому и наибольшему. По площади наибольшего листа различия между гибридами наблюдались только в отдельные годы изучения: в 2016 г. площадь листа у гибридов на цитоплазмах А3 и А5 оказалась меньше гибрида на цитоплазме А2–207,7–227,4 см² против 296,6 см²; в 2017 г. более низкие значения признака проявились у гибридов на цитоплазмах А2 и А3 по сравнению с гибридом на цитоплазме А4–185,1–213,0 и 293,6 см² соответственно. Однако в среднем за 3 года у гибридов Карлик 4в/Восторг на основе стерильных цитоплазм А1, А2, А3, А4, А5, А6 достоверные различия не установлены (рис. 2). Вместе с тем А4 и А6 Карлик 4в/Восторг отличились более высоким значением признака – 243,2–245,0 см². Доля фактора «Тип ЦМС» в общей изменчивости признака составила 9,5%, фактора «Метеорологические условия» и взаимодействие АВ – 24,0–29,4%. Крупные наибольшие листья сформированы гибридами в условиях 2016–2017 гг. – 237,9–245,9 см² (рис. 2).

Наименьшей площадью флагового листа характеризовался гибрид на цитоплазме А3 (104,4 см²) по сравнению с гибридами на цитоплазмах А2, А4, А5 и А6 (130,3–136,3 см²), а гибрид на цитоплазме А1 (109,2 см²) – по сравнению с гибридом на цитоплазме А2 в среднем за 2016–2018 гг. испытаний. При этом вклад фактора «Тип ЦМС» в общую изменчивость признака составил 14,0%. Средовый фактор также повлиял на вариабельность линейных размеров флагового листа. Наибольшая величина признака установлена в условиях хорошей влагообеспеченности (2017 г.) – 150,7 см² в среднем по всем гибридам, тогда как в более засушливых условиях – 105,4–116,8 см² (рис. 2).

Влияние цитоплазмы на общую кустистость проявлялось только в отдельные годы. В условиях 2017 г. увеличению побегообразования способствовала цитоплазма А4 (3,19 стеблей на одно растение), а в 2018 г. – цитоплазмы А1, А2 и А5 (2,00–2,65 стеблей на одно растение). Наименьшая общая кустистость в среднем по 6 гибридам (1,20 шт.) выявлена в засушливом 2016 г., характеризующемся суммой активных температур 2702°С и осадков в 137,3 мм по сравнению с 2017–2018 гг. (2,01–2,04 шт.). Вклад фактора «Тип ЦМС» в общую изменчивость признака составил 7,3%, фактора «Метеорологические условия года» – 37,1%, их взаимодействие – 37,2% (рис. 3).

На урожайность биомассы тип стерильной цитоплазмы оказывал влияние только в отдельные сезоны, а в среднем по годам различия между изоядерными гибридами отсутствовали. В 2017 г. гибриды на основе А3 и А4 характеризовались наибольшей продуктивностью биомассы (25,1–27,23 т/га) по сравнению с гибридами на основе А2 и А6 (15,47–16,27 т/га). В условиях 2018 г. гибриды на цитоплазме А4 формировали наименьшую урожайность – всего 10,10 т/га. Вклад генотипического фактора составил 9,6% (рис. 3). В среднем по гибридам урожайность биомассы различалась в разные годы: в 2017 г. – 20,63 т/га; в 2018 г. – 17,83 т/га; в 2016 г. – 12,85 т/га.

В литературе отмечено, что испытание гибридов F1 на основе стерильных цитоплазм А1, А2 и А3 в трех агроклиматических микрорайонах (Техас, США) показало отсутствие цитоплазматического эффекта на урожайность и биохимический состав биомассы [2]. Следует отметить, что сорго-суданковые гибриды, полученные с использованием цитоплазм А3, А4 и 9Е, также не различались по продуктивности биомассы [16].

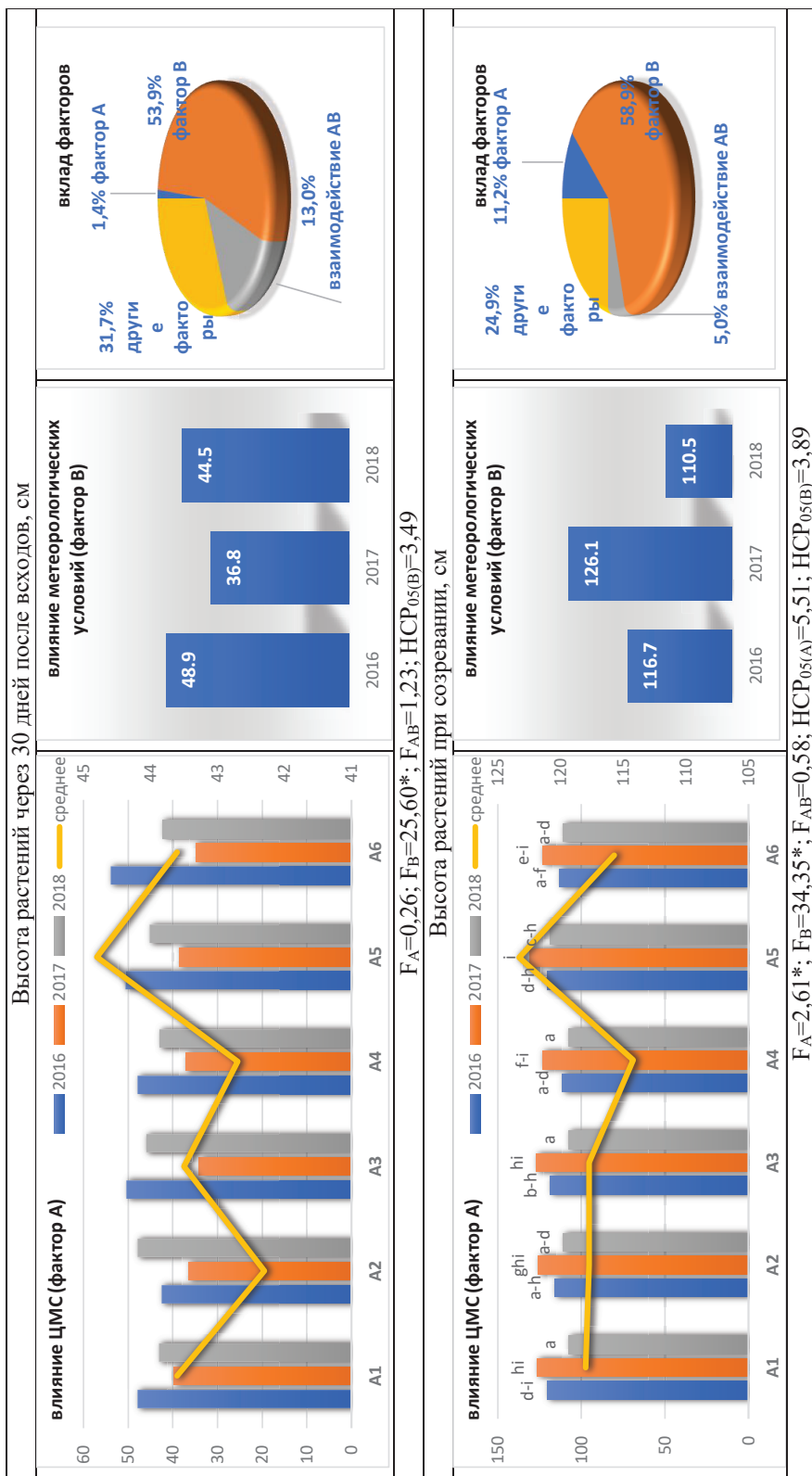


Рис. 1. Влияние типа ЦМС (А1, А2, А3, А4, А5, А6) и метеорологических условий на формирование высоты растений у гибридов F1 (2016–2018 гг.)

Примечание. Данные на рисунке, обозначенные разными буквами, различаются между собой в соответствии с тестом множественных сравнений Дункана

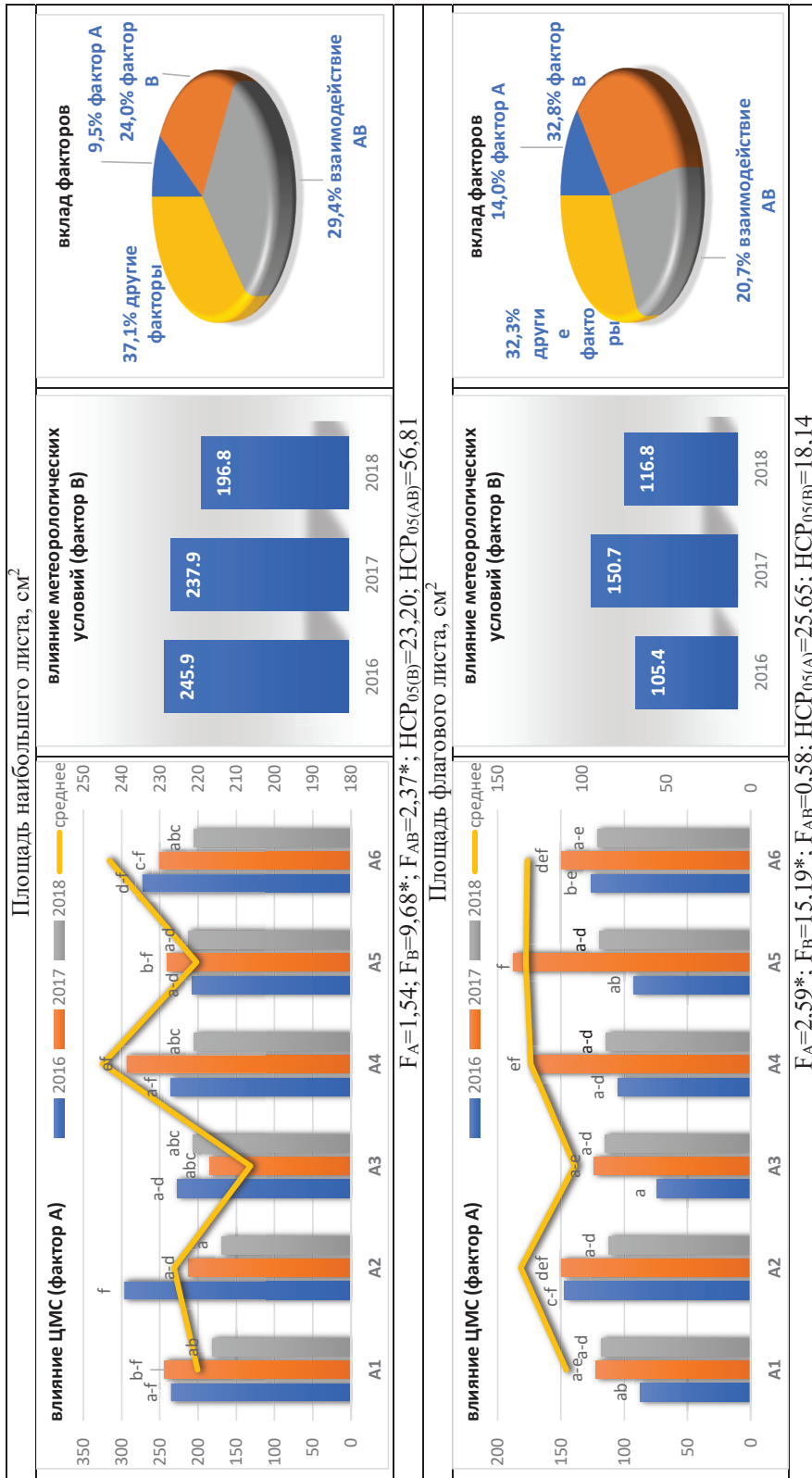


Рис. 2. Влияние типа ЦМС (А1, А2, А3, А4, А5, А6) и метеорологических условий на формирование площади листьев у гибридов F1 (2016–2018 гг.)

Примечание. Данные на рисунке, обозначенные разными буквами, различаются между собой в соответствии с тестом множественных сравнений Дункана.

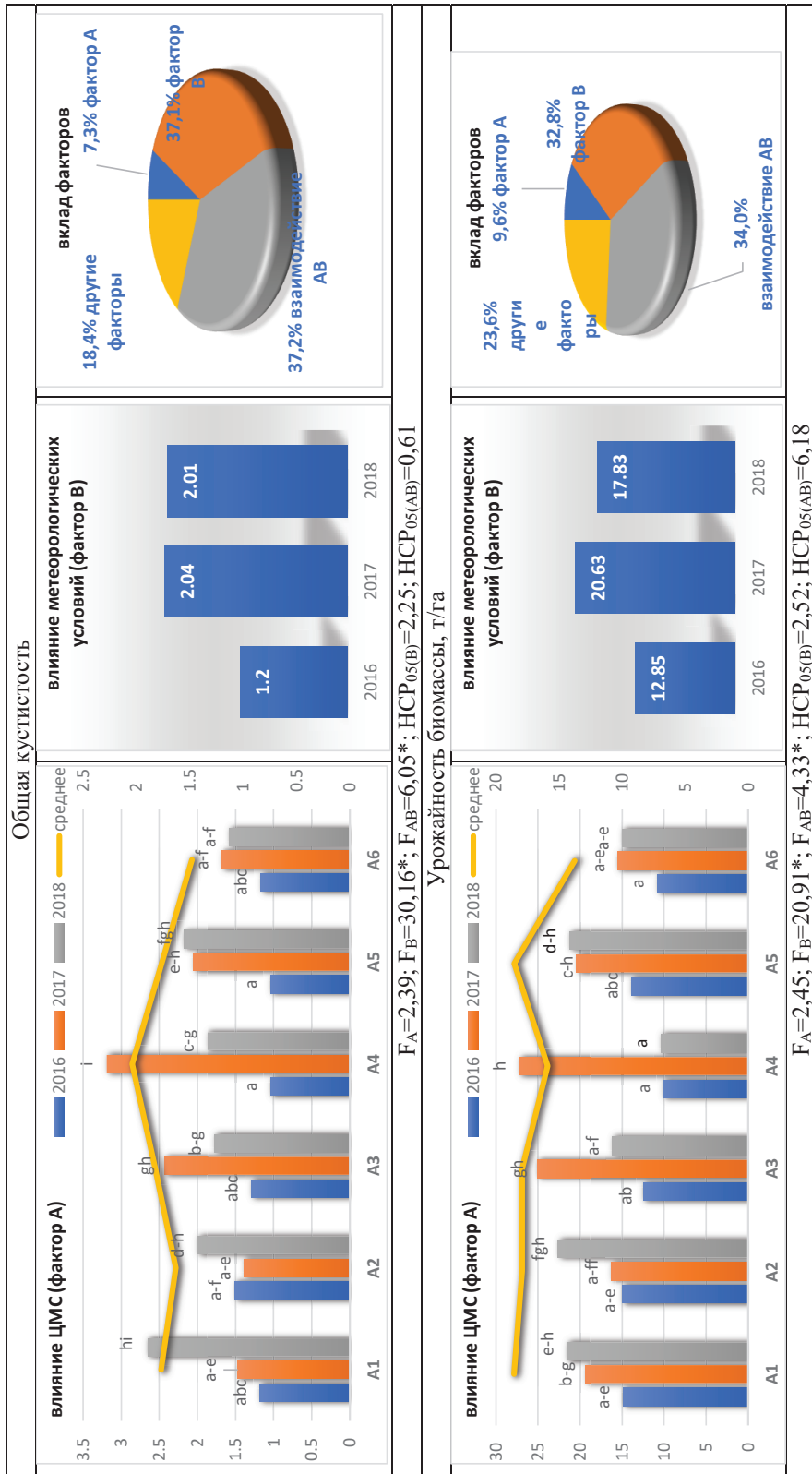


Рис. 3. Влияние типа ЦМС (А1, А2, А3, А4, А5, А6) и метеорологических условий на формирование площади листьев у гибридов F1 (2016–2018 гг.)
Примечание. Данные на рисунке, обозначенные разными буквами, различаются между собой в соответствии с тестом множественных сравнений Дункана.

Выводы

Таким образом, сравнительный анализ гибридов F1 на основе изоядерных ЦМС-линий с разными типами стерильных цитоплазм показал различия между ними по некоторым селекционным признакам в среднем за 2016–2018 гг. В результате статистической обработки экспериментальных данных методом двухфакторного дисперсионного анализа выявлено, что у гибридов с линией Восторг цитоплазма А5 увеличивает высоту растений в сравнении с цитоплазмами А1, А2, А3, А4, А6.

Наибольшая площадь флагового листа оказалась у гибридов на цитоплазмах А2, А4, А5 и А6 в сравнении с гибридом на цитоплазме А3. По высоте растений через 30 дней после всходов площади наибольшего листа и урожайность биомассы в среднем за изучаемый период у гибридов F1 не различались. Вместе с тем наибольшая продуктивность биомассы выявлена у гибридов на цитоплазмах А1 и А5, а наименьшая – на цитоплазмах А4 и А6. При этом вклад фактора «Тип ЦМС» в общую изменчивость селекционных признаков составил 1,4–14,0%, фактора «Метеорологические условия года» – 24,0–58,9%.

Высокозначимым оказалось взаимодействие условий внешней среды и типа стерильной цитоплазмы на формирование общей кустистости и урожайности надземной биомассы гибридов (вклад фактора АВ – 34,0–37,2%), что обусловило значимость различий между ними в вегетационный период 2017–2018 гг. Наибольшая величина хозяйственных признаков выявлена в условиях более влажного 2017 г. (ГТК = 1,005 за вегетационный период сорго), за исключением площади наибольшего листа. В селекции гибридов сорго с использованием генетически различных типов стерильных цитоплазм по комплексу селекционных признаков целесообразно включать в скрещивания ЦМС-линию на цитоплазме А5.

Библиографический список

1. Aruna C., Shrotria P.K., Pahuja S.K. et al. Fodder yield and quality in forage sorghum: scope for improvement through diverse male sterile cytoplasm // Crop & Pasture Science. 2013. – № 63 (12). – Pp. 1114–1123. DOI: 10.1071/cp12215.
2. Hoffmann L., Rooney W.L. Cytoplasm Has No Effect on the Yield and Quality of Biomass Sorghum Hybrids // Journal of Sustainable Bioenergy Systems. – 2013. – № 2. – Pp. 129–134. DOI: 10.4236/JSBS.2013.32018.
3. Hossian Md.S., Islam Md.N., Rahman Md.M. et al. Sorghum: A prospective crop for climatic vulnerability, food and nutritional security // Journal of Agriculture and Food Research. – 2022. – № 8. – Pp. 100300. DOI: 10.1016/j.jafr.2022.100300.
4. Jabereldar A.A., Naim A.M., Abdalla A.A. et al. Effect of Water Stress on Yield and Water Use Efficiency of Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) in Semi-Arid Environment // International Journal of Agriculture and Forestry. – 2017. – 7 (1). Pp. 1–6.
5. Khaton M.A., Sagar A., Tajkia J.E. Effect of moisture stress on morphological and yield attributes of four sorghum varieties // Progressive Agriculture. – 2016. – № 27 (3). – Pp. 265–271. DOI: 10.3329/pa.v27i3.30806.
6. Vacek L.A., Rooney W.L. Effects of cytoplasm, male and female parents on biomass productivity in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) // Journal of Crop Improvement. – 2018. – № 32 (5). – Pp. 635–647. DOI: 10.1080/15427528.2018.1483458.
7. Reddy B.V.S., Ramesh S., Ortiz R. Genetic and Cytoplasmic-Nuclear Male sterility in Sorghum // Plant Breed. Reviews / J. Janik. Hoboken (ed.). – New Jersey, Wiley & Sons, Inc. – 2005. – № 25. – Pp. 139–169.
8. Salas Fernandez M.G., Strand K., Hamblin M.T. et al. Genetic analysis and phenotypic characterization of leaf photosynthetic capacity in a sorghum (*Sorghum* spp.)

diversity panel // Genetic Resources and Crop Evolution. – 2015. – № 62. – Pp. 939–950. DOI: 10.1007/s10722–014–0202–6.

9. *Stephens J.C., Holland R.F.* Cytoplasmic Male-Sterility For Hybrid Sorghum Seed Production // *Agronomy Journal*. – 1954. – № 44. – Pp. 369–373. DOI:10.2134/agronj1952.000219622004400070008x.

10. *Zhang H., Xu N., Wu X. et al.* Effects of four types of sodium salt stress on plant growth and photosynthetic apparatus in sorghum leaves // *Journal of Plant Interactions*. – 2018. – № 13 (1). – Pp. 506–513. DOI: org/10.1080/17429145.2018.1526978.

11. *Бычкова В.В., Эльконин Л.А.* Влияние типа стерильной цитоплазмы на фотосинтетические параметры гибридов зернового сорго // *Зерновое хозяйство России*. – 2016. № 4. – С. 5–8.

12. *Бычкова В.В., Эльконин Л.А.* Влияние стерильных цитоплазм на фотосинтетическую активность и урожайность биомассы у гибридов F1 сорго // *Российская сельскохозяйственная наука*. – 2017. – № 2. – С. 10–15.

13. *Вертикова Е.А., Ермолаева Г.И.* Результаты селекции зернового сорго и рекомендации к внедрению в условиях Нижнего Поволжья // *Аграрный научный журнал*. – 2018. – № 5. – С. 5–10. DOI: 10.28983/asj.v0i5.466.

14. *Володин А.Б., Капустин С.И., Капустин А.С.* Селекция гибридного сорго в Ставропольском крае // *Таврический вестник аграрной науки*. – 2017. – № 4 (12). – С. 50–56.

15. *Кибальник О.П., Эльконин Л.А., Кожемякин В.В.* Влияние разных типов стерильных цитоплазм на морфобиологические и селекционно-ценные признаки гибридов F1 зернового сорго // *Кукуруза и сорго*. – 2009. – № 4. – С. 19–22.

16. *Кибальник О.П., Эльконин Л.А.* Влияние типа стерильной цитоплазмы на проявление хозяйственно-полезных признаков у сорго-суданковых гибридов // *Доклады РАСХН*. – 2012. – № 1. – С. 12–15.

17. *Кибальник О.П., Семин Д.С.* Использование А3, А4 и 9Е типов ЦМС в селекции гибридов зернового сорго // *Российская сельскохозяйственная наука*. – 2018. – № 5. – С. 22–25. DOI: 10.31857/S250026270000640–9.

18. *Ковтунов В.В., Сухенко Н.Н., Луштина О.А. и др.* Оценка коллекционных образцов сорго зернового для селекции новых сортов // *Зерновое хозяйство России*. – 2022. – № 14 (4). – Pp. 46–51. DOI: 10.31367/2079–8725–2022–82–4–46–51.

19. *Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур*. – М.: Госагропром, 1989. – Вып. 2. – 194 с.

20. *Радченко Е.Е., Алматьева Н.В., Карабицина Ю.И. и др.* Разработка и валидация CAPS-маркера, Ассоциированного с геном *Rf2* у сорго (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) // *Биотехнология и селекция растений*. – 2021. – № 4 (2). – С. 38–47. DOI: 10.30901/2658–6266–2021–2–04.

21. *Эльконин Л.А., Геращенко Г.А., Доманина И.В. и др.* Наследование реверсий к мужской фертильности у стерильных гибридов сорго с ЦМС типа 9Е, индуцированных условиями внешней среды // *Генетика*. – 2015. – № 51 (3). – С. 312–323.

EFFECT OF STERILE CYTOPLASM TYPE ON VALUABLE BREEDING TRAITS OF F1 SORGHUM HYBRIDS UNDER DIFFERENT MOISTURE CONDITIONS

O.P. KIBALNIK

(Russian Research and Design-Technological Institute of Sorghum and Corn)

Some researchers have found the influence of sterile cytoplasm on the manifestation of biological and valuable breeding traits in sorghum. In addition, some authors detect the influence of sterile

cytoplasm, while others describe the absence of differences between F1 hybrids obtained from CMS lines with the same nuclear genome and differing only in the type of sterile cytoplasm. In this context, the aim of the research was to determine the effect of sterile cytoplasm A1, A2, A3, A4, A5, A6 and meteorological conditions of growing F1 hybrids of grain sorghum on the main valuable breeding traits. In this work, F1 hybrids were obtained on the basis of CMS lines with the Karlik 4v genome and six types of sterile cytoplasm, and the Vostorg line was used as a pollinator. The studies were carried out in 2016–2018, with different hydrothermal regimes of plant growing seasons ($GTK=0.51-1.01$). As a result of the experiment, for the first time an increase in plant height during maturation was found in the A5 Karlik 4v/Vostorg hybrid (123.3 cm) compared to hybrids on cytoplasm A1, A2, A3, A4, A6 (118.0 cm); a decrease in the flag leaf area was found in the A3 Karlik 4v/ hybrid (104.4 cm²) compared to hybrids on cytoplasm A2, A4, A5 and A6 (130.3–136.3 cm²). On average, during the test period, hybrids on A1 and A5 cytoplasm produced a higher biomass yield (18.53–18.57 t/ha) than hybrids on A4 and A6 cytoplasm (13.76–15.91 t/ha), but the differences were not significant. At the same time, the contribution of the factor “CMS type” to the total variability of breeding traits ranged from 1.4 to 14.0%; “meteorological conditions” of the year – 24.0–58.9%. When breeding sorghum hybrids using genetically different types of sterile cytoplasm, it is advisable to include a CMS line on the A5 cytoplasm in the crossing according to the complex of breeding characteristics.

Key words: sorghum, F1 hybrids, CMS lines, types of sterile cytoplasm, breeding characteristics, yield.

Reference

1. Aruna C., Shrotria P.K., Pahuja S.K. et al. Fodder yield and quality in forage sorghum: scope for improvement through diverse male sterile cytoplasm. *Crop & Pasture Science*. 2013; 63(12): 1114–1123. DOI: 10.1071/cp12215
2. Hoffmann L., Rooney W.L. Cytoplasm Has No Effect on the Yield and Quality of Biomass Sorghum Hybrids. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*. 2013; 2: 129–134. DOI: 10.4236/JSBS.2013.32018
3. Hossian Md.S., Islam Md.N., Rahman Md.M. et al. Sorghum: A prospective crop for climatic vulnerability, food and nutritional security. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2022; 8: 100300. DOI: 10.1016/j.jafr.2022.100300
4. Jabereldar A.A., Naim A.M., Abdalla A.A. et al. Effect of Water Stress on Yield and Water Use Efficiency of Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) in Semi-Arid Environment. *International Journal of Agriculture and Forestry*. 2017; 7(1): 1–6.
5. Khaton M.A., Sagar A., Tajkia J.E. Effect of moisture stress on morphological and yield attributes of four sorghum varieties. *Progressive Agriculture*. 2016; 27(3): 265–271. DOI: 10.3329/pa.v27i3.30806
6. Vacek L.A., Rooney W.L. Effects of cytoplasm, male and female parents on biomass productivity in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Journal of Crop Improvement*. 2018; 32(5): 635–647. DOI: 10.1080/15427528.2018.1483458
7. Reddy B.V.S., Ramesh S., Ortiz R. Genetic and Cytoplasmic-Nuclear Male sterility in Sorghum. *Plant Breed. Reviews*. J. Janik. Hoboken (ed.). New Jersey, Wiley & Sons, Inc. 2005; 25: 139–169.
8. Salas Fernandez M.G., Strand K., Hamblin M.T. et al. Genetic analysis and phenotypic characterization of leaf photosynthetic capacity in a sorghum (*Sorghum* spp.) diversity panel. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2015; 62: 939–950. DOI: 10.1007/s10722-014-0202-6
9. Stephens J.C., Holland R.F. Cytoplasmic Male-Sterility For Hybrid Sorghum Seed Production. *Agronomy Journal*. 1954; 44: 369–373. DOI: 10.2134/agronj1952.00021962004400070008x

10. Zhang H., Xu N., Wu X. et al. Effects of four types of sodium salt stress on plant growth and photosynthetic apparatus in sorghum leaves. *Journal of Plant Interactions*. 2018; 13(1): 506–513. DOI: org/10.1080/17429145.2018.1526978
11. Bychkova V.V., El'konin L.A. Effect of the Type of Sterile Cytoplasm on Photosynthetic Parameters of Grain Sorghum Hybrids. *Zernovoe khozyaistvo Rossii*. 2016; 4: 5–8. (In Rus.)
12. Bychkova V.V., El'konin L.A. Effect of Sterile Cytoplasm on Photosynthetic Activity and Biomass Yield in F1 Sorghum Hybrids. *Rossiyskaya sel'skokhozyaystvennaya nauka*. 2017; 2: 10–15. (In Rus.)
13. Vertikova E.A., Ermolaeva G.I. Results of the selection of grain sorghum and recommendations for implementation in the conditions of the Lower Volga region. *Agrarniy nauchnyy zhurnal*. 2018; 5: 5–10. DOI: 10.28983/asj.v0i5.466 (In Rus.)
14. Volodin A.B., Kapustin S.I., Kapustin A.S. Breeding of Hybrid Sorghum in the Stavropol Territory. *Tavricheskiy vestnik agrarnoy nauki*. 2017; 4(12): 50–56. (In Rus.)
15. Kibal'nik O.P., El'konin L.A., Kozhemyakin V.V. Effect of Different Types of Sterile Cytoplasm on Morphobiological and Valuable Breeding Traits of F1 Hybrids of Grain Sorghum. *Kukuruza i sorgo*. 2009; 4: 19–22. (In Rus.)
16. Kibal'nik O.P., El'konin L.A. Effect of the Type of Sterile Cytoplasm on the Manifestation of Economically Useful Traits in Sorghum-Sudankovyh Hybrids. *Doklady RASKhN*. 2012; 1: 12–15. (In Rus.)
17. Kibal'nik O.P., Semin D.S. Use of A3, A4 and 9E Types of CMS in the Breeding of Grain Sorghum Hybrids. *Rossiyskaya sel'skokhozyaystvennaya nauka*. 2018; 5: 22–25. DOI: 10.31857/S250026270000640–9 (In Rus.)
18. Kovtunov V.V., Sukhenko N.N., Lushpina O.A. et al. Evaluation of Collection Samples of Grain Sorghum for Breeding New Varieties. *Zernovoe khozyaistvo Rossii*. 2022; 14(4): 46–51. DOI: 10.31367/2079–8725–2022–82–4–46–51 (In Rus.)
19. *Methods of State Variety Testing of Agricultural Crops*. 2d ed. M.: Gosagroprom, 1989: 194. (In Rus.)
20. Radchenko E.E., Alpat'yeva N.V., Korobitsyna Yu.I. et al. Development and Validation of CAPS Marker Associated with *Rf2* Gene in Sorghum (*Sorghum Bicolor* (L.) Moench). *Biotekhnologiya i selektsiya rasteniy*. 2021; 4(2):38–47. DOI: 10.30901/2658–6266–2021–2–04 (In Rus.)
21. El'konin L.A., Gerashchenkov G.A., Domanina I.V. et al. Inheritance of Reversions to Male Fertility in Sterile Sorghum Hybrids with CMS Type 9E Induced by Environmental Conditions. *Genetika*. 2015; 51(3): 312–323. (In Rus.)

Кибальник Оксана Павловна, канд. биол. наук, главный научный сотрудник отдела сорговых культур ФГБНУ «Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы»; 410050, Российская Федерация, г. Саратов, 1-й Институтский пр-д, 4; e-mail: kibalnik79@yandex.ru; тел.: (845) 279–49–69

Oksana P. Kibal'nik, CSc (Bio), Chief Research Associate, Department of Sorghum Crops, Russian Research, Design and Technology Institute of Sorghum and Corn (4, 1-iy Institutskiy Passage, Saratov, 410050, Russian Federation; phone: (8452) 79–49–69; E-mail: kibalnik79@yandex.ru)