

Р.А. Биктимиров

Башкирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства — обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Уфа, Россия

✉ biktimirov.rifx@yandex.ru

Поступила в редакцию:
01.02.2024

Одобрена после рецензирования:
12.04.2024

Принята к публикации:
26.04.2024

Research article

DOI: 10.32634/0869-8155-2024-382-5-74-78

Rifkhat A. Biktimirov

Bashkir Research Institute of Agriculture is a separate structural subdivision of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia

✉ biktimirov.rifx@yandex.ru

Received by the editorial office:
01.02.2024

Accepted in revised:
12.04.2024

Accepted for publication:
26.04.2024

Наследование хозяйственно ценных признаков у гибридов F1 зернового сорго при насыщающих скрещиваниях

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Эффект гетерозиса имеет большое значение в селекции сельскохозяйственных культур. В селекции зернового сорго гетерозис широко используется для увеличения урожайности и расширения адаптивных способностей гибридных растений.

Методы. Объектом исследований были 13 наиболее скороспелых комбинаций F1 зернового сорго и их родительских форм. В схему скрещиваний включены 7 материнских (Рось, Зернышко, Славянка, Огонек, Премьера, Меркурий, Орловское) и 6 отцовских (Рось, Зернышко, Славянка, Огонек, Белочка, Меркурий) форм зернового сорго.

Параметры гетерозиса рассчитывали по методике Д.С. Омарова.

Результаты. Наибольший эффект истинного гетерозиса по длине метелки выявлен в комбинациях Славянка — Огонек (15,6%), Премьера — Меркурий (15,0%), а наибольшее значение гипотетического гетерозиса установлено в скрещиваниях Огонек — Рось (22,2%), Славянка — Огонек (20,1%) и Премьера — Меркурий (20,3%). Высокая степень фенотипического доминирования выявлена и у комбинаций Славянка — Огонек (5,1) и Премьера — Меркурий (4,4).

Оценка гибридов и родительских форм показывает, что многие из них по урожайности зерна с одного растения превысили своего родителя, таким образом, проявив истинный гетерозис, который варьировал от 6,1% у гибрида Зернышко — Огонек до 49,5% у гибрида Премьера — Рось. Наибольшие значения гипотетического гетерозиса проявились в комбинациях Огонек — Рось и Премьера — Рось (62,8% и 51,7%). В гибридных комбинациях степень доминирования варьировала от 0,6 до 34,0. Сверхдоминирование было отмечено у гибридов Премьера — Рось (34,0) и Огонек — Рось (6,7).

Ключевые слова: зерновое сорго, гетерозис, гибрид, признаки, урожайность, сорт

Для цитирования: Биктимиров Р.А. Наследование хозяйственно ценных признаков у гибридов F1 зернового сорго при насыщающих скрещиваниях. *Аграрная наука.* 2024; 382(5): 74–78.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-382-5-74-78>

© Биктимиров Р.А.

Inheritance of economically valuable traits in f1 hybrids of grain sorghum during saturating crosses

ABSTRACT

Relevance. The effect of heterosis is of great importance in crop breeding. Heterosis is defined as an increase in the value of the trait of F1 hybrids compared to the average value of both parents. In grain sorghum breeding, heterosis is widely used to increase the yield and expand the adaptive abilities of hybrid plants.

Methods. The object of research was 13 of the most precocious F1 combinations of grain sorghum and their parent forms. The crossing scheme includes seven maternal (Ros, Zernishko, Slavyanka, Ogonek, Premiere, Mercury, Orlovskoye) and 6 paternal (Ros, Zernishko, Slavyanka, Ogonek, Belochka, Mercury) forms grain sorghum. The parameters of heterosis were calculated using the method of D.S. Omarov.

Results. The greatest effect of true heterosis along the length of the panicle was revealed in the combinations: Slavyanka — Ogonyok (15.6%), Premiere — Mercury (15.0%), and the highest value of hypothetical heterosis was found in the crosses Ogonyok — Ros (22.2%), Slavyanka — Ogonyok (20.1%) and Premiere — Mercury (20.3%). Also, a high degree of phenotypic dominance was found in the combinations Slavyanka — Ogonyok (5.1) and Premiere — Mercury (4.4).

Evaluation of hybrids and parental forms shows that many of them exceeded their parent in terms of grain yield from one plant, thus showing true heterosis, which varied from 6.1% in the Zernishko — Ogonyok hybrid to 49.5% in Premiere — Ros. The highest values of hypothetical heterosis appeared in combinations Ogonyok — Ros and Premiere — Ros — 62.8% and 51.7%. In hybrid combinations, the degree of dominance varied from 0.6 to 34.0. Overdomination was noted for the Premiere — Ros combination (34.0) and the Ogonyok — Ros (6,7).

Key words: grain sorghum, heterosis, hybrid, traits, yield, variety

For citation: Biktimirov R.A. Inheritance of economically valuable traits in f1 hybrids of grain sorghum during saturating crosses. *Agrarian science.* 2024; 382(5): 74–78 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-382-5-74-78>

© Biktimirov R.A.

Введение/Introduction

Сорго (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) — диплоидная зерновая культура с более высокой эффективностью фотосинтеза (C4). Она имеет $2n = 20$ хромосом и размер генома 750 Мб [1]. Злак является одной из пяти важнейших зерновых культур, выращиваемых во всем мире¹, важным источником корма и продовольствия во многих развивающихся странах [2, 3].

Во всем мире засуха является наиболее важным абиотическим стрессом, смягчить последствия которой можно с помощью выведения сортов, адаптированных к новым экологическим условиям и устойчивых к вредителям и болезням [4, 5]. Сорго считается одной из наиболее устойчивых к засухе зерновых культур, обладает генетической изменчивостью, что позволяет создавать новые сорта, адаптированные к различным агроклиматическим условиям [6].

Для селекции сорго на зерновую продуктивность особый интерес представляет создание гетерозисных гибридов [7]. Гетерозис, по мнению авторов, можно расценивать как общий рост «мощности» хозяйственно ценных признаков гибридов первого поколения в сравнении с лучшей родительской формой [8].

Важнейшими преимуществами селекции на гетерозис наряду с повышенной продуктивностью, которая зачастую значительно превосходит лучшую родительскую форму, является возможность объединения в генотипе гибридного растения большого числа ценных признаков [9, 10].

О гетерозисе гибридов сорго по сравнению со средними и лучшими родителями по урожайности зерна сообщали Charman *et al.* [11]. Этот эффект по длине метелки колебался от 39,6 до 48,4% и от 13,1 до 17,9% — по ширине метелки [12]. Hariprasanna *et al.* [13] также наблюдали гетерозис по многим признакам. S.K. Jain и P.R. Patel [14] выявили, что гибриды зернового сорго демонстрировали высокий эффект гетерозиса по урожайности зерна и сухого вещества.

Информация о характере и эффекте воздействия генов на важнейшие хозяйственно ценные признаки и наилучшем подборе родительских пар у сорго зависит от оценки гетерозиса [15, 16]. Знания о эффекте гетерозиса могут помочь лучше охарактеризовать линии и гибриды зернового сорго для дальнейшей селекционной работы с этой культурой.

Цель данных исследований — проведение оценки истинного и гипотетического гетерозиса у гибридов раннеспелых и среднеспелых групп созревания зернового сорго F1 по хозяйственно ценным признакам.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Работа проводилась в 2021–2023 гг. в селекционном центре по растениеводству Башкирского научно-исследовательского института сельского хозяйства Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук в условиях Предуральской степной зоны Республики Башкортостан, пгт Чишмы (54°35'N; 55°26' E) в три этапа:

✓ первый (2015–2017 гг.) — изучение 32 сортообразцов зернового сорго коллекции ВИР и выделение скороспелых высокопродуктивных форм для использования в качестве отцовских форм;

✓ второй (2018–2020 гг.) — проведение 3-кратного насыщающего скрещивания;

✓ третий (2021–2023 гг.) — определение величины гетерозиса и степени фенотипического доминирования у гибридов F1.

Почва опытного участка — среднесуглинистый типичный чернозем средней мощности. Изучение почвенного покрова было проведено в разные годы Я.Т. Суюндуковой, И.М. Габбасовой, И.О. Чанышевым, А.Н. Хасановым. Среднее содержание гумуса в верхнем пахотном слое колеблется от 7 до 9% (по Тюрину). Реакция почвенного раствора от нейтральной до слабощелочной — 7,1–7,4. Содержание минерального азота — 30–35 мг/кг (по Кьельдалю), обменного калия (по Чирикову) и подвижного фосфора (по Чирикову) — 20,5 мг / 100 г и 10,2 мг / 100 г сухой почвы, содержание кальция (по Айдиняну) — 35 мг-экв / 100 г.

Метеоусловия, по данным Чишминской метеостанции ФГБУ «Башкирское УГМС», за период вегетации в годы исследования были различными. 2021 год был засушливым и жарким (ГТК = 0,65). 2022 год отличался хорошей влагообеспеченностью в первой половине лета, прохладной погодой в начале вегетации, жаркой и засушливой — во второй. Гидротермический коэффициент составил 1,3. В 2023 году вегетация гибридов и родительских форм проходила в условиях высокой равномерной по месяцам влагообеспеченности и теплой погоды (ГТК = 1,7).

Предшественник — яровая пшеница. Посев в зависимости от метеоусловий осуществляли 26–29 мая нормой высева 0,6 млн всхожих семян на 1 га сеялкой СКС-6-10 (ФНАЦ ВИМ, Россия) с шириной междурядий 45 см. Площадь делянки — 13,5 м², учетная — 8 м². Делянки размещали рендомизированно, повторность — трехкратная.

Объектом исследований были 13 наиболее скороспелых комбинаций F1 зернового сорго и их родительские формы. В схему скрещиваний включены 7 наиболее скороспелых материнских (Рось, Славянка, Премьера (Самарский ФИЦ РАН), Зернышко (ФАНЦ Юго-Востока), Огонек, Меркурий (РосНИИСК «Россорго»), Орловское (АНЦ «Донской») и 6 отцовских (Рось, Зернышко, Славянка, Огонек, Белочка (ФАНЦ Юго-Востока), Меркурий) форм зернового сорго.

Оценки гетерозиса были проведены по следующим признакам: продолжительность периода «всходы — полная спелость», урожайность зерна с одного растения, длина метелки, выход ножки метелки из раструба верхнего листа.

Параметры гетерозиса рассчитывали по методике Д.С. Омарова²:

$$G_{\text{истинный}} = [(F1 - P_{\text{лучш}}) / P_{\text{лучш}}] \times 100\%,$$

$$G_{\text{гипотетический}} = [(F1 - P_{\text{ср}}) / P_{\text{ср}}] \times 100\%.$$

Степень доминирования или депрессии гибрида определяли по формуле:

$$Hr = (F1 - P_{\text{ср}}) / (P_{\text{лучш}} - P_{\text{ср}})^2,$$

где: F1 — средний показатель признака у гибридных форм; $P_{\text{лучш}}$ — средний показатель признака лучшей родительской формы, $P_{\text{ср}}$ — среднее арифметическое показателя обеих родительских форм.

Математическую обработку данных осуществляли методом дисперсионного анализа по Б.А. Доспехову³.

¹ FAO (2014). Crops Primary Equivalent. Available online at: <http://faostat.fao.org>. (Retrieved 15th March, 2015).

² Омаров Д.С. К методике учета и оценки гетерозиса у растений. Сельскохозяйственная биология. 1975; 1: 123–127.

³ Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат. 1985; 356.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Гетерозис по конечному продукту, то есть выходу зерна, проявляется как кумулятивный эффект гетерозиса по компонентным признакам. В настоящем исследовании детальное изучение 13 скрещиваний выявило этот факт, поскольку большинство скрещиваний показали значительный истинный и гипотетический гетерозис по урожайности зерна и его компонентным признакам, то есть длине метелки, выходу ножки метелки из раструба верхнего листа.

Основным фактором, который влияет на распространение, рост, развитие и урожайность зернового сорго в условиях Республики Башкортостан, является тепло, поэтому скороспелость — желательный признак, который помогает выводить ранние сорта. Для оценок были отобраны только те гибриды, у которых наблюдался гетерозис на скороспелость.

Продолжительность периода «всходы — полная спелость» в исследованиях колебалась от 73 до 81 дня у гибридов F₁ и от 79 до 86 дней у родительских форм.

Истинный гетерозис по признаку продолжительности периода «всходы — полная спелость» варьировал от 2,4 до 15,1%, а гипотетический гетерозис — от 1,2 до 11,5%. Степень доминирования колебалась от 0,7 до 4,0, то есть почти все комбинации показывали сверхдоминирование по данному признаку. Наибольшее значение истинного гетерозиса по данному признаку наблюдалось у гибридов Зернышко и Славянка (15,1%), Зернышко и Огонек (11,6%) (рис. 1). Наибольший гипотетический гетерозис установлен в тех же комбинациях, соответственно, 11,5% и 8,9%.

Анализ урожайности зерна с одного растения показал, что изучаемые гибридные комбинации обеспечили достаточно высокий урожай (табл. 1). Диапазон варьирования данного признака у гибридов F₁ составил 13,1–29,7 г, а у родительских форм — от 13,4 до 36,7 г. Оценка гибридов и родительских форм показывает, что многие из них по данному признаку превысили своего родителя, таким образом, проявив истинный гетерозис, который варьировал от 6,1% у гибрида Зернышко и Огонек до 49,5% — Премьера и Рось (табл. 2). Высокий эффект истинного гетерозиса проявили гибриды Огонек и Рось (49,0%), Меркурий и Белочка (24,4%). Наибольшие значения гипотетического гетерозиса проявились в комбинациях Огонек и Рось, Премьера и Рось (62,8% и 51,7%).

В гибридных комбинациях степень доминирования варьировала от 0,6 до 34,0. Сверхдоминирование было отмечено у гибридов Премьера и Рось (34,0) и Огонек и Рось (6,7). Таким образом, эти гибриды показали наибольшее значение гетерозиса — как истинного, так и гипотетического, а также высокую степень доминирования.

Размер метелки имеет существенное влияние на урожайность зерна у сорго зернового. Интервалы варьирования данного признака у гибридов F₁ от 24,4 до 31,4 см, а у родительских форм от 21,9 до 27,5 см.

Рис. 1. Эффект гетерозиса по продолжительности периода «всходы — полная спелость» (2021–2023 гг.)

Fig. 1. The effect of heterosis on the duration of the period “shoots — full ripeness” (2021–2023)

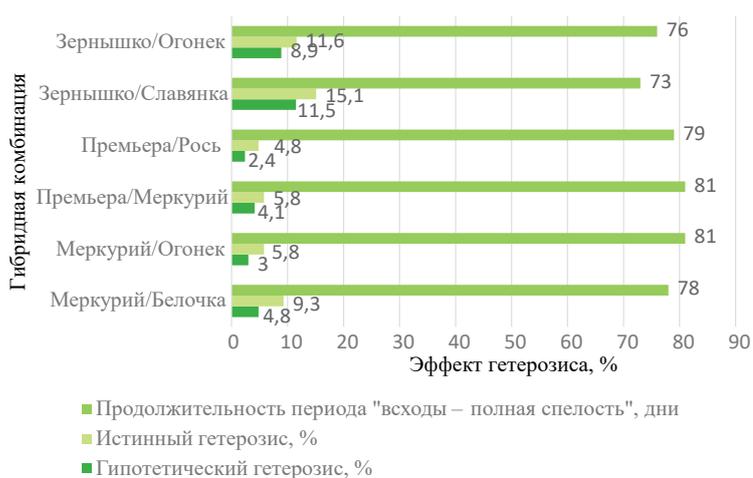


Таблица 1. Характеристика гибридов F₁ и родительских форм по хозяйственно ценным признакам

Table 1. Characteristics of F₁ hybrids and parent forms according to economically valuable characteristics

Статистический показатель	Год	Урожайность зерна, г / 1 растение		Длина метелки, см		Выход ножки метелки из раструба верхнего листа, см	
		P _{ср} *	F ₁ *	P _{ср}	F ₁	P _{ср}	F ₁
Лимиты (min — max)	2021	13,1–21,0	13,4–29,9	19,6–23,4	20,7–29,7	8,9–13,7	9,8–18,8
	2022	15,2–26,1	16,2–32,3	22,2–28,4	21,2–31,7	12,6–16,8	13,0–23,5
	2023	19,4–29,7	21,2–36,7	23,6–32,1	24,3–34,3	13,9–19,4	14,0–27,5
Средняя и ее ошибка (x̄ ± Sx)	2021	16,90 ± 0,47	20,70 ± 1,02	21,40 ± 0,22	24,90 ± 0,57	11,90 ± 0,20	16,30 ± 0,33
	2022	19,20 ± 0,73	23,50 ± 0,98	25,20 ± 0,30	26,40 ± 0,61	14,70 ± 0,17	18,60 ± 0,37
	2023	25,60 ± 0,65	28,20 ± 0,93	27,70 ± 0,47	31,40 ± 0,40	16,80 ± 0,27	21,70 ± 0,61
Стандартное отклонение S	2021	2,58	5,61	1,33	3,12	1,40	2,44
	2022	4,01	5,40	1,83	3,33	1,20	2,90
	2023	3,57	5,12	2,84	2,59	1,97	4,72
Коэффициент вариации V, %	2021	15,26	27,04	6,24	12,55	11,72	15,01
	2022	20,80	22,94	7,27	12,59	8,18	15,64
	2023	14,04	18,22	10,27	8,28	11,75	21,69

Примечание: * F₁ — гибриды, P_{ср} — родительские формы гибридов.

Наибольшее значение истинного гетерозиса по длине метелки выявлено в скрещиваниях Славянка и Огонек (15,6%), Премьера и Меркурий (15,0%), а максимальный эффект гипотетического гетерозиса отмечен в комбинациях Огонек и Рось (22,2%), Славянка и Огонек (20,1%), Премьера и Меркурий (20,3%). Высокая степень фенотипического доминирования выявлена у комбинаций Славянка и Огонек (5,1), Премьера и Меркурий (4,4).

Важное значение в селекционной работе имеет такой признак зернового сорго, как выход ножки метелки из раструба верхнего листа. Метелки, высоко поднятые над листостебельной массой, при механизированной уборке срезаются гораздо лучше, а зерно при обмолаоте получается чистым от примесей и быстрее сохнет. Данный признак варьировал у гибридов F₁ от 10,2 до 23,7 см, у родительских форм от 10,4 до 17,5 см.

Истинный гетерозис по этому признаку варьировал в гибридных комбинациях от 16,4 до 55,5%. Наибольший эффект истинного гетерозиса выявлен у комбинаций Огонек и Зернышко, Рось и Огонек — 55,5% и 46,4% соответственно. Что касается гипотетического гетерозиса, то он варьировал от 11,3 до 75,1%, наибольшие значения которого отмечены в комбинациях Огонек и Зернышко; Меркурий и Огонек, Меркурий и Белочка — 75,1%, 61,2% и 60,0% соответственно. Степень

Таблица 2. Значения гетерозиса (%) (истинного и гипотетического) у гибридов F1 зернового сорго (в среднем за 2021–2023 гг.)

Table 2. Values of heterocyst (%) (true and hypothetical) in F1 hybrids of grain sorghum (on average for 2021–2023)

Гибридная комбинация	Урожайность зерна с одного растения		Длина метелки, см		Выход ножки метелки из раструба верхнего листа	
	Г _{ист.}	Г _{гип.}	Г _{ист.}	Г _{гип.}	Г _{ист.}	Г _{гип.}
Рось и Славянка	16,5	24,2	2,5	10,1	17,0	23,8
Рось и Огонек	9,0	19,1	-4,7	6,0	46,4	49,3
Зернышко и Огонек	-6,1	12,1	8,2	16,4	33,3	53,3
Зернышко и Славянка	8,1	26,1	8,2	12,2	8,5	28,9
Славянка и Рось	11,5	19,2	-9,0	-2,3	9,7	16,1
Славянка и Огонек	14,8	18,2	15,6	20,1	-7,3	-3,7
Огонек и Рось	49,0	62,8	9,8	22,2	15,6	18,0
Огонек и Зернышко	15,5	38,0	-4,3	2,9	55,5	75,1
Премьера и Рось	49,5	51,7	-6,9	-2,2	23,7	29,4
Премьера и Меркурий	1,3	10,8	15,0	20,3	10,0	33,3
Меркурий и Огонек	3,8	21,3	-8,4	1,6	35,9	61,2
Меркурий и Белочка	24,4	34,9	2,5	9,3	28,0	60,0
Орловское и Славянка	16,3	34,4	2,2	9,1	-16,4	-11,3
Среднее по гибридам	16,4	28,6	2,3	9,6	19,9	33,3

Примечание: Г_{ист.} — гетерозис истинный, Г_{гип.} — гетерозис гипотетический.

доминирования варьировала среди гибридных комбинации от -2,0 до 24,6. Сверхдоминирование по этому признаку было отмечено у комбинаций Рось и Огонек (24,6), Огонек и Рось (9,0).

Проведен анализ проявления степени доминирования по хозяйственно ценным признакам с целью получения информации о характере наследования хозяйственно ценных признаков (табл. 3).

В итоге выявлено, что положительное доминирование и сверхдоминирование характерны для 7,6% и 92,3% гибридных комбинаций соответственно. Сверхдоминирование при наследовании урожайности зерна с одного растения проявилось у 92,3% гибридов. По длине метелки и выходу ножки метелки из раструба верхнего листа также преобладало наследование по типу сверхдоминирования (61,5% и 84,6% соответственно).

Выводы/Conclusion

В результате исследований выделены лучшие гибридные комбинации по продолжительности периода «всходы — полная спелость», урожайности зерна с одного растения, длины метелки и выхода ножки метелки из раструба верхнего листа: Рось и Славянка, Зернышко и Огонек, Зернышко и Славянка, Огонек и Рось, Огонек и Зернышко, Премьера и Рось, Меркурий и Белочка.

Выявлено среднее варьирование признака «длина метелки» у родительских форм и гибридов и по признаку

Таблица 3. Проявление доминирования по хозяйственно ценным признакам у гибридов F1 зернового сорго, % (в среднем за 2021–2023 гг.)

Table 3. Manifestation of dominance in economically valuable traits in F1 hybrids of grain sorghum, % (on average for 2021–2023)

Признак	Параметр	H _p < -1	-1 < H _p < -0,5	-0,5 < H _p < +0,5	+0,5 < H _p < +1	+1 < H _p
		Урожайность зерна с одного растения	количество генотипов	–	–	–
	%	–	–	–	7,7	92,3
Длина метелки	количество генотипов	–	–	4	1	8
	%	–	–	30,7	7,6	61,5
Выход ножки метелки из раструба верхнего листа	количество генотипов	2	–	–	–	11
	%	15,4	–	–	–	84,6

Примечание: Значения — ∞ < H_p < -1 соответствуют гибридной депрессии; -1 < H_p < -0,5 — депрессии, обусловленной эффектами отрицательного доминирования; -0,5 < H_p < 0,5 — промежуточному наследованию, вызванному аддитивными эффектами генов; 0,5 < H_p < 1 — доминированию; 1 < H_p < ∞ — сверхдоминированию (истинный гетерозис).

«выход ножки метелки из раструба верхнего листа» у родительских форм (V = 6,2–12,5%). Более высокие значения коэффициента вариации выявлены по урожайности зерна — 14,0–27,0%.

Гетерозис по продолжительности периода «всходы — полная спелость», урожайности зерна с одного растения и выходу ножки метелки из раструба верхнего листа отмечен почти во всех комбинациях.

Четыре гибридные комбинации по итогам испытаний характеризовались проявлением истинного и гипотетического гетерозиса по всем хозяйственно ценным признакам. Наибольший эффект гетерозиса по признакам продуктивности отмечен у гибридов Рось и Славянка, Огонек и Рось, Меркурий и Белочка, Зернышко и Славянка (2,5–49,0%). Выявлено положительное сверхдоминирование у 61,5–92,3% гибридных комбинаций по хозяйственно ценным признакам.

Анализ степени фенотипического доминирования и гетерозиса показал высокие показатели по урожайности зерна и выходу ножки метелки из раструба верхнего листа у гибридных комбинаций, где в качестве отцовской формы был взят сорт Рось. Наибольший эффект гетерозиса по урожайности зерна наблюдался у гибридов с материнской формой Премьера (49,5%) и Огонек (49,0%). По выходу ножки метелки из раструба верхнего листа наибольший положительный эффект гетерозиса был у комбинаций с материнскими формами Рось, Огонек и Меркурий (15,6–55,5%).

Автор несет ответственность за работу и представленные данные. Автор несет ответственность за плагиат. Автор объявил об отсутствии конфликта интересов.

The author is responsible for the work and the submitted data. The author is responsible for plagiarism. The author declared no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках программы «Реализация направлений, соответствующих программе создания и развития Селекционно-семеноводческого центра по кормовым культурам УФИЦ РАН» (соглашение № 075-15-2021-549, регистрационный № 121110100009-8).

FUNDING

The work was carried out within the framework of the program "Implementation of directions corresponding to the program for the creation and development of the Breeding and seed seed production center for forage crops of the UFIC RAS" (agreement No. 075-15-2021-549, registration No. 121110100009-8).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Abreha K.B. et al. Sorghum in dryland: morphological, physiological, and molecular responses of sorghum under drought stress. *Planta*. 2022; 255: 20. <https://doi.org/10.1007/s00425-021-03799-7>
- He S. et al. Combining ability of cytoplasmic male sterility on yield and agronomic traits of sorghum for grain and biomass dual-purpose use. *Industrial Crop & Products*. 2020; 157: 112894. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112894>

REFERENCES

- Abreha K.B. et al. Sorghum in dryland: morphological, physiological, and molecular responses of sorghum under drought stress. *Planta*. 2022; 255: 20. <https://doi.org/10.1007/s00425-021-03799-7>
- He S. et al. Combining ability of cytoplasmic male sterility on yield and agronomic traits of sorghum for grain and biomass dual-purpose use. *Industrial Crop & Products*. 2020; 157: 112894. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112894>

3. Кибальник О.П., Каменова О.Б., Жук Е.А., Ларина Т.В., Орехова Л.А., Калинин Ю.А. Эффекты гетерозиса у гибридов F1 сорго на основе цитоплазматической мужской стерильности. *Зерновое хозяйство России*. 2020; (2): 49–53. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2020-68-2-49-53>
4. Вертикова Е.А., Пылнев В.В. Использование гетерозиса в селекции сорговых культур для условий Нижнего Поволжья. *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2021; 91: 51–57. <https://doi.org/10.21515/1999-1703-91-51-57>
5. Биктимиров Р.А., Низаева А.А. Оценка экологической стабильности и пластичности сортов зернового сорго в условиях Республики Башкортостан. *Зерновое хозяйство России*. 2021; (1): 39–43. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2021-73-1-39-43>
6. Биктимиров Р.А., Шакирзянов А.Х., Низаева А.А. Экологическая стабильность и пластичность кормового сорго в Республике Башкортостан. *Достижения науки и техники АПК*. 2019; 33(8): 46–49. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10810>
7. Кибальник О.П. Использование эффекта гетерозиса в селекции сорго. *Вестник Новосибирского государственного аграрного университета (НГАУ)*. 2019; (2): 15–24. <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2019-51-2-15-24>
8. Begna T. Combining ability and heterosis in plant improvement. *Open Journal of Plant Science*. 2021; 6(1): 108–117. <https://doi.org/10.17352/ojps.000043>
9. Ковтунова Н.А., Володин А.Б., Ковтунов В.В. Гетерозис в селекции сахарного сорго. *Зерновое хозяйство России*. 2017; (1): 11–17. <https://www.elibrary.ru/yguj0l>
10. Al-Aaref K.A.O., Ahmad M.S.H., Hovny M.R.A., Youns O.A. Combining Ability and Heterosis for some Agronomic Characters in Grain Sorghum (*Sorghum bicolor*. (L.) moench). *Middle East Journal of Agriculture Research*. 2016; 5(2): 258–271.
11. Chapman S.C., Cooper M., Butler D.G., Henzell R.G. Genotype by environment interactions affecting grain sorghum. I. Characteristics that confound interpretation of hybrid yield. *Australian Journal of Agricultural Research*. 2000; 51(2): 197–208. <https://doi.org/10.1071/AR99020>
12. Hemlata S., Vithal S. Heterosis in [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. *Agricultural Science Digest*. 2006; 26(4): 245–248.
13. Haripranna K., Rajenderkumar P., Patil J.V. Parental selection for high heterosis in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] — Combining ability, heterosis and their inter-relationships. *Crop Research*. 2012; 44(3): 400–408.
14. Jain S.K., Patel P.R. Combining ability and heterosis for grain yield, fodder yield and other agronomic traits in Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. *Electronic Journal of Plant Breeding*. 2014; 5(2): 152–157.
15. Ingle K.P. et al. Heterosis and Combining Ability for Grain Yield Trait in Rabi Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] Using Line x Tester Mating Design. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2018; (s6): 1925–1934.
16. Kibalnik O., Kukoleva S., Semin D., Efremova I., Starchak V. Evaluation of the combining ability of CMS lines in crosses with samples of grain sorghum and Sudan grass. *Agronomy Research*. 2021; 19(4): 1781–1790. <https://doi.org/10.15159/AR.21.120>
3. Kibalnik O.P., Kameneva O.B., Zhuk E.A., Larina T.V., Orekhova L.A., Kalinin Yu.A. The effects of heterosis of the sorghum hybrids F1 based on cytoplasmic male sterility. *Grain Economy of Russia*. 2020; (2): 49–53 (in Russian). <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2020-68-2-49-53>
4. Vertikova E.A., Pylnev V.V. The use of heterosis in the breeding of sorghian crops for the conditions of the Lower Volga region. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2021; 91: 51–57 (in Russian). <https://doi.org/10.21515/1999-1703-91-51-57>
5. Biktimirov R.A., Nizaeva A.A. The estimation of environmental stability and adaptability of the grain sorghum varieties in the Republic of Bashkortostan. *Grain Economy of Russia*. 2021; (1): 39–43 (in Russian). <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2021-73-1-39-43>
6. Biktimirov R.A., Shakirzyanov A.Kh., Nizaeva A.A. Environmental Stability and Plasticity of Feeding Sorghum in the Republics of Bashkortostan. *Achievements of science and technology in agribusiness*. 2019; 33(8): 46–49 (in Russian). <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10810>
7. Kibalnik O.P. The use of the heterosis effect in sorghum breeding. *Bulletin of the Novosibirsk State Agrarian University (NGAU)*. 2019; (2): 15–24 (in Russian). <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2019-51-2-15-24>
8. Begna T. Combining ability and heterosis in plant improvement. *Open Journal of Plant Science*. 2021; 6(1): 108–117. <https://doi.org/10.17352/ojps.000043>
9. Kovtunova N.A., Volodin A.B., Kovtunov V.V. Heterosis in breeding of sweet sorghum. *Grain Economy of Russia*. 2017; (1): 11–17 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/yguj0l>
10. Al-Aaref K.A.O., Ahmad M.S.H., Hovny M.R.A., Youns O.A. Combining Ability and Heterosis for some Agronomic Characters in Grain Sorghum (*Sorghum bicolor*. (L.) moench). *Middle East Journal of Agriculture Research*. 2016; 5(2): 258–271.
11. Chapman S.C., Cooper M., Butler D.G., Henzell R.G. Genotype by environment interactions affecting grain sorghum. I. Characteristics that confound interpretation of hybrid yield. *Australian Journal of Agricultural Research*. 2000; 51(2): 197–208. <https://doi.org/10.1071/AR99020>
12. Hemlata S., Vithal S. Heterosis in [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. *Agricultural Science Digest*. 2006; 26(4): 245–248.
13. Haripranna K., Rajenderkumar P., Patil J.V. Parental selection for high heterosis in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] — Combining ability, heterosis and their inter-relationships. *Crop Research*. 2012; 44(3): 400–408.
14. Jain S.K., Patel P.R. Combining ability and heterosis for grain yield, fodder yield and other agronomic traits in Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. *Electronic Journal of Plant Breeding*. 2014; 5(2): 152–157.
15. Ingle K.P. et al. Heterosis and Combining Ability for Grain Yield Trait in Rabi Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] Using Line x Tester Mating Design. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2018; (s6): 1925–1934.
16. Kibalnik O., Kukoleva S., Semin D., Efremova I., Starchak V. Evaluation of the combining ability of CMS lines in crosses with samples of grain sorghum and Sudan grass. *Agronomy Research*. 2021; 19(4): 1781–1790. <https://doi.org/10.15159/AR.21.120>

ОБ АВТОРАХ

Рифхат Анварович Биктимиров

кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией селекции и семеноводства кормовых культур
biktimirov.rifx@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7800-9521>

Башкирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства — обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук,
пр-т. Октября, 71, Уфа, 450054, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Rifkhat Anvarovich Biktimirov

Candidate of Agricultural Sciences, Leading Researcher Associate, Head of the Laboratory of Breeding and Seed Production of Forage Crops
biktimirov.rifx@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7800-9521>

Bashkir Scientific Research Institute of Agriculture is a separate structural unit of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,
71 Oktyabrya Ave., Ufa, 450054, Russia