

Эффект гетерозиса у гибридов сорго на основе цитоплазматической мужской стерильности*

Н. А. КОВТУНОВА

Аграрный научный центр «Донской», Научный городок, 3, Зерноград, 347740, Российская Федерация

Резюме. Исследование проводили с целью определения эффекта гетерозиса и характера наследования количественных признаков у сорго-суданковых гибридов. Работу выполняли в Ростовской области в 2020–2022 гг.; почва – обыкновенный карбонатный чернозем. В 2020 г. (ГТК=0,68) и 2022 г. (ГТК=0,52) отмечали среднюю засуху, в 2021 г. (ГТК=0,82) – недостаточное увлажнение. Объект исследований – 13 сорго-суданковых гибридов с различным характером наследования признаков. По продолжительности периода «всходы–выметывание» ($h_p=0,6\ldots 11,0$), содержанию сухого вещества ($h_p=0,3\ldots 2,5$) отмечено сверхдоминирование и частичное (неполное) доминирование родительской формы с большим значением признака; по высоте растений ($h_p=1,02\ldots 2,02$) и облиственности ($h_p=1,00\ldots 23,33$) – доминирование и сверхдоминирование; по урожайности зеленой массы ($h_p=1,4\ldots 12,6$) – сверхдоминирование, независимо от цитоплазмы; по содержанию сырого протеина ($h_p=-1,6\ldots 32,5$) – от гибридной депрессии до сверхдоминирования. Наибольшие эффекты гетерозиса (истинного $G_{ист.}$ и гипотетического $G_{гип.}$) отмечены у гибридов по высоте растений ($G_{ист.}=0,9\ldots 20,01\%$, $G_{гип.}=17,9\ldots 51,2\%$), облиственности ($G_{ист.}=0\ldots 48,2\%$, $G_{гип.}=17,4\ldots 51,8\%$) и урожайности зеленой массы ($G_{ист.}=22,1\ldots 91,2\%$, $G_{гип.}=59,8\ldots 144,3\%$). Наибольшее содержание сырого протеина (9,2...10,3 %) отмечено у гибридов АПВ-1115 × Светлопленчатая 2, АПВ-1115 × Кудесница, Джетта × ЧСС-2, Джетта × Яктик, превысившие стандарт на 1,2...2,3 %. Благодаря эффекту гетерозиса наибольшие урожайности зеленой массы и сухого вещества, а также сбор переваримого отмечены у сорго-суданковых гибридов АПВ-1115×Кудесница – Гордей (5376; 1116 и 80 г/м² соответственно) и АПВ-1115×Светлопленчатая 2 – Добрыня (5949; 1202 и 84 г/м²). Гибрид Добрыня внесен в Государственный реестр селекционных достижений, Гордей передан на Государственное сортоиспытание с 2023 г.

Ключевые слова: сорго (*Sorghum × drummondii* (Steud.) Millsp. & Chase), гибрид, наследование, гетерозис, родительская форма, доминирование, урожайность, признак.

Сведения об авторах: Н. А. Ковтунова, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник (e-mail: n-beseda@mail.ru).

Для цитирования: Ковтунова Н. А. Эффект гетерозиса у гибридов сорго на основе цитоплазматической мужской стерильности // Достижения науки и техники АПК. 2023. Т. 37. № 7. С. 39–44. doi: 10.53859/02352451_2023_37_7_39.

*работа выполнена в рамках Государственного задания ФГБНУ «АНЦ «Донской» (тема № 0505-2022-0003).

The effect of heterosis in sorghum hybrids based on cytoplasmic male sterility

N. A. Kovtunova

Agriarian Scientific Center "Donskoi", Nauchnyi gorodok, 3, Zernograd, 347740, Russian Federation

Abstract. The study aimed to determine the effect of heterosis and the nature of the inheritance of quantitative traits in sorghum-sudangrass hybrids. The work was carried out in the Rostov region in 2020-2022; the soil was ordinary carbonate chernozem. In 2020 (HTC=0.68) and 2022 (HTC=0.52), an average drought was observed, in 2021 (HTC=0.82) – insufficient moisture. The object of research was 13 sorghum-sudangrass hybrids with different patterns of trait inheritance. According to the duration of the period "sprouts-heading" ($h_p=0.6-11.0$), dry matter content ($h_p=0.3-2.5$), overdominance and partial (incomplete) dominance of the parental form with a large value of the trait were observed; by plant height ($h_p=1.02-2.02$) and foliage ($h_p=1.00-23.33$) – dominance and overdominance; according to the yield of green mass ($h_p=1.4-12.6$) – overdominance, regardless of the cytoplasm; according to the content of crude protein ($h_p=-1.6-32.5$) – from hybrid depression to overdominance. The greatest effects of heterosis (true H(true) and hypothetical H(hyp.)) were observed in sorghum-sudangrass hybrids APV-1115 × Svetloplenchataya 2, APV-1115 × Magician, Jetta × ChSS-2, Jetta × Yaktik, exceeding the standard by 1.2...2.3%. Due to the effect of heterosis, the highest yields of green mass and dry matter, as well as the collection of digestible material, were observed in sorghum-sudangrass hybrids APV-1115 × Kudesnitsa – Gordey (5376; 1116 and 80 g/m², respectively) and APV-1115 Svetloplenchataya 2 – Dobrynya (5949; 1202 and 84 g/m²). The Dobrynya hybrid is included in the State Register of Breeding Achievements, Gordey has been transferred to the State Variety Testing since 2023.

Keywords: sorghum (*Sorghum × drummondii* (Steud.) Millsp. & Chase); hybrid; inheritance; heterosis; parental form; dominance; productivity; trait.

Author Details: N. A. Kovtunova, Cand. Sc. (Agr.), leading research fellow (e-mail: n-beseda@mail.ru).

For citation: Kovtunova NA [The effect of heterosis in sorghum hybrids based on cytoplasmic male sterility]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2023;37(7):39–44. Russian. doi: 10.53859/02352451_2023_37_7_39.

Увеличение урожайности многих сельскохозяйственных культур связано с созданием гибридных форм, более продуктивных, чем сорта. При этом необходимо знание наследственности и изменчивости признаков растений, а также гетерозиса и форм его проявления. Изучение гетерозисного эффекта у сорговых культур – одна из главных задач современной селекции, способствующая выявлению потенциальных возможностей этой ценной кормовой культуры и быстрому внедрению ее в сельскохозяйственное производство. Вследствие генетической неоднородности родительских форм, сорго-суданковые гибриды, созданные на основе цитоплазматической мужской стерильности (ЦМС), обладают высоким эффектом гетерозиса как по урожайности зеленой массы и сена, так и по устойчивости к неблагоприятным условиям возделывания [1, 2, 3].

При их создании в качестве материнских форм используют стерильные линии зернового и сахарного сорго, а в

качестве отцовской – константные линии, сорта суданской травы. Использование ЦМС у сорго получило широкое распространение во многих странах и считается самым экономически выгодным способом получения гибридных семян [4, 5, 6].

По габитусу растения сорго-суданковых гибридов сходны с растениями суданской травы, отличаясь более высоким, мощным, толстым, хорошо облиственным стеблем. Высокая интенсивность начального роста и послекосного отрастания у гибридов оказывает положительное влияние, во-первых, на конкурентоспособность с сорняками за свет, воду, питательные элементы, во-вторых, дает возможность получать 2...3 полноценных укоса зеленой массы [7, 8]. По питательности зеленая масса сорго-суданковых гибридов не уступает однолетним культурам и содержит достаточное количество питательных веществ (углеводов, жиров, витаминов), благодаря чему ее можно использовать на силос,

сенаж, сено, зеленый корм, травяную муку, выпас [2, 8, 9].

ВАНЦ «Донской» ведут работу по селекции на гетерозис с использованием ЦМС. Создан ряд новых сорго-суданковых гибридов с хорошо развитой корневой системой и мощной листостебельной массой, способных обеспечивать 2...3 кося зеленой массы за сезон [9].

Цель исследования – определение эффекта гетерозиса и характера наследования основных количественных признаков у новых сорго-суданковых гибридов селекции Аграрного научного центра «Донской».

Условия, материалы и методы. Эксперименты выполняли в Аграрном научном центре «Донской» (Ростовская область). Предшественник – озимая пшеница; почва – обыкновенный карбонатный чернозем, со следующими агрохимическими показателями в слое 0...30 см: содержание гумуса – 3,3 % (по Тюрину), среднее содержание P_2O_5 – 18...20 мг/кг и повышенное K_2O – 340...370 мг/кг почвы (по Мачигину) [10]. По плодородию и физико-химическим свойствам почва опытного участка благоприятна для выращивания сорго.

Метеорологические условия в годы исследований (2020–2022 гг.) значительно различались, что позволило провести всестороннюю оценку гибридов в контрастных условиях. Так, высокая температура воздуха в мае и хорошая увлажненность почвы в 2020 г. (19,0 °C и 63,9 мм) и 2021 г. (18,1 °C и 65,0 мм) способствовали дружному и быстрому прорастанию семян. В 2022 г. пониженная температура и большое количество осадков (15,4 °C и 79,9 мм) привела к задержке всходов. Отсутствие осадков в июне 2020, 2022 гг. и среднесуточная температура воздуха выше средне многолетних данных на 2,6...4,7 °C, или 12,6...22,9% привели к уменьшению продолжительности периода «всходы–выметывание» и, следовательно, снижению урожайности зеленой массы за первый укос. В целом, за годы исследований средняя температура воздуха в течение вегетации была выше средне многолетней нормы на 1,5...2,0 °C. Наибольшая сумма осадков за период «май–сентябрь» отмечена в 2021 г. (273 мм при норме 268 мм). Значения ГТК указывают на среднюю засуху в 2020 г. – ГТК = 0,68 и 2022 г. – ГТК = 0,52; и недостаточное увлажнение в 2021 г. – ГТК = 0,82.

Объект исследований – 13 сорго-суданковых гибридов, созданных в АНЦ «Донской», с использованием ЦМС-линий сорго сахарного (АПВ-1115) и зернового (Деметра и Джетта) и перспективных сортов суданской травы (Кудесница, Светлопленчатая 2, Светлопленчатая 4, Землярина, ЧТ-22, Тополек 576, Яктик, ЧСС-2, Сочностебельная), включая стандарт гибрид Густолистный (АПВ-1115 × Сочностебельная 2). Он допущен к использованию по Северо-Кавказскому и Нижне-Волжскому регионам РФ.

Посев и полевые наблюдения проводили по методике Государственного сортоиспытания (*Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Зерновые, крупяные, зернобобовые, кукуруза и кормовые культуры. М., 1989. Вып. 2. 194 с.*). Посев осуществляли в оптимальные сроки – 3...10 мая, нормой высева – 1,6 млн всхожих семян на 1 га. Способ посева – рядовой. Площадь делянки – 21 м², повторность четырехкратная. Через каждые 10 делянок располагали стандарт. Расположение делянок в опыте – систематическое. Уборку на зеленую массу проводили в начале выметывания.

Содержание основных питательных веществ, содержащихся в зеленой массе, определяли в лаборатории биохимической оценки растений по общепринятым методикам: сырой протеин – методом Кьельдаля (ГОСТ 53951-2010); сырой жир – по количеству обезжиренного остатка методом С.Р. Рушковского (ГОСТ 31700-2012); сырую клетчатку – по Геннебергу и Штомману (ГОСТ 31675-2012).

Статистический анализ полученных данных проведен по Б. А. Доспехову (*Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Альянс, 2014. 351 с.*). Степень доминирования определена методом Гриффинга (*Griffing B. Concept of General and Specific Combining Ability in Relation to Diallel Crossing Systems. Australian Journal of Biological Sciences. 1956. №9. P. 463-493*), величина гетерозиса – по методике Д. С. Омарова (*Омаров Д.С. К методике учёта и оценки гетерозиса у растений // Сельскохозяйственная биология. 1975. С. 123–127*).

Результаты и обсуждение. Создание гибридов на стерильной основе с заданными параметрами – довольно трудоемкий процесс, начальный этап которого – правильный подбор родительских пар для гибридизации. При этом учитывают не только урожайность, высоту растений, облиственность, устойчивость к неблагоприятным факторам, но и продолжительность вегетационного периода [2, 7, 9]. Цветение у сорго длится 4...5 дней. Если ЦМС-линия зацветет на 4...5 дней позже, чем опылитель, то опыление возможно пылью, образовавшейся на метелках подгонов суданской травы. Если ЦМС-линия зацветет раньше, чем сорт, то опыление не происходит, семена не завязываются. Поэтому к этому вопросу нужно подходить особенно тщательно, учитывая биологические особенности каждого сорта и линии. Так, у линии Джетта цветение начинается в верхней части метелки, когда ее большая часть находится в раструбе флагового листа. А у сорта суданской травы Яктик от полного выметывания до начала цветения проходит 3...4 дня, к моменту цветения метелка полностью выходит из пазухи листа.

Опылители характеризовались высокой урожайностью зеленой массы (2388...3380 г/м²) и отнесены к средне-спелой группе созревания (продолжительность периода «всходы–выметывание» 50...55 дней), кроме сорта Яктик (раннеспелая группа – 49 дней). Для них характерна высокорослость (181...218 см) и хорошая облиственность (8...10 листьев на растении). Варьирование сортов по содержанию сухого вещества (18,3...23,1 %) отразилось на урожайности сухого вещества, которая варьировала от 528 (Сочностебельная 2) до 754 г/м² (Светлопленчатая 4).

ЦМС-линии сорго зернового Деметра и Джетта значительно уступали на 40,1...60,1 % по урожайности зеленой массы не только сортам суданской травы, но и на 38,6...61,4 % ЦМС-линии сорго сахарного АПВ-1115 (табл. 1).

Гибриды с самой раннеспелой ЦМС-линией Деметра относятся к среднеранней группе с продолжительностью периода «всходы–выметывание» – в среднем 52 дня. У остальных гибридов (с АПВ-1115 и Джеттой) период до 1 укоса длился 57 дней (среднеспелая группа созревания). Наибольшая продолжительность вегетации отмечена у гибридов АПВ-1115 × Светлопленчатая 2 (58 дней) и Джетта × ЧТ-22 (59 дней), наименьшая – у Деметра × Яктик (50 дней).

По продолжительности периода «всходы–выметывание» у гибридов, полученных с ЦМС-линиями АПВ-1115 и Деметра, отмечали наследование по типу сверждоминирования ($h_p = 1,50...11,00$), у гибридов, полученных на основе линии Джетта – частичное доминирование родительских форм с большим значением ($h_p = 0,56...0,83$). У всех гибридов отмечено превышение над среднеродительским значением ($G_{гил} = 0,9...13,7\%$), истинный гетерозис наблюдали у гибридов, полученных на цитоплазме АПВ-1115 и Деметра ($G_{ист} = 1,0...11,8\%$). Отрицательный истинный гетерозис наблюдали у гибридов с ЦМС-линией Джетта, которая характеризуется самым продолжительным периодом «всходы–выметывание» – 60 дней (табл. 2).

Таблица 1. Характеристика родительских форм (среднее за 2020–2022 гг.)

Родительская форма	Продолжительность периода «всходы–выметывание», дни	Высота растений, см	Количество листьев, шт.	Содержание, %		Сбор, г/м ²		
				сухого вещества,	сырого протеина	зеленой массы	сухого вещества	переваримого протеина
Сочностебельная 2	50	196	9	22,1	8,9	2388	528	36
Кудесница	54	205	9	21,8	8,3	3380	737	46
Светлопленчатая 2	52	198	9	23,0	8,3	3185	732	46
Светлопленчатая 4	51	204	10	22,4	8,6	3367	754	49
Землярина	55	207	10	23,0	8,1	3259	748	46
ЧТ-22	54	181	9	23,1	6,9	2932	678	36
Тополек 576	51	201	8	19,1	9,6	3202	613	45
Яктик	49	218	8	19,8	10,5	2914	576	46
ЧСС-2	51	209	9	18,3	9,5	3022	553	40
АПВ-1115	55	145	9	19,0	9,6	2200	418	30
Деметра	50	121	7	15,2	8,6	1350	205	13
Джетта	60	105	9	16,6	8,2	1750	291	18
НСР ₀₅	3	38	1	2,7	0,9	671	183	12

Высота растений и облиственность оказывают наибольшее влияние на урожайность зеленой массы [9, 11, 12].

Все исследуемые гибриды отнесены к группе высокорослых с высотой растений от 201 до 230 см. Следует отметить, что гибриды с низкорослыми ЦМС-линиями зернового сорго Деметрой и Джеттой показали наибольшие среднегрупповые значения (216 и 221 см). Соответственно и эффекты гетерозиса у них были наибольшими ($\Gamma_{гип.} = 28,3...51,2\%$; $\Gamma_{ист.} = 0,9...19,6\%$). Максимальная в опыте высота отмечена у гибрида Джетта × Яктик (230 см), превышение над сортом Яктик (большой родитель) составило 12 см ($\Gamma_{ист.} = 5,5\%$), над среднеродительским – 69 см ($\Gamma_{гип.} = 42,4\%$), стандартом – 29 см ($\Gamma_{конк.} = 21,1\%$). Наследование признака носило доминантный и сверхдоминантный характер ($h_p = 1,02...2,02$) у всех гибридов. Данные о высоком эффекте гетерозиса по высоте растений у гибридов сорго согласуются с исследованиями О. П. Кибальник, С. И. Капустина, Е. А. Вертиковой [1, 2, 13]. У сорго-суданковых гибридов с ЦМС-линиями сорго зернового проявляется наибольший эффект гетерозиса по этому признаку ($\Gamma_{гип.} = 32,7...44,1\%$, $\Gamma_{ист.} = 5,1...9,8\%$).

Облиственность у изученных сорго-суданковых гибридов составляла от 9 до 13 листьев. У гибридов, полученных с участием линии сорго сахарного АПВ-1115, отмечены не только наибольшие абсолютные значения (в среднем – 12 листьев на растение), но и высокие величины гипотетического (до 51,8 %) и истинного гетерозиса (до 48,2 %).

Таблица 2. Гетерозис и степень доминирования у сорго-суданковых гибридов по признакам «продолжительность периода «всходы–выметывание» и «высота растений» (2020–2022 гг.)

Гибрид	Продолжительность периода «всходы–выметывание»					Высота растений				
	дни	гетерозис, %			h_p	см	гетерозис, %			h_p
		$\Gamma_{ист.}$	$\Gamma_{гип.}$	$\Gamma_{конк.}$			$\Gamma_{ист.}$	$\Gamma_{гип.}$	$\Gamma_{конк.}$	
Густолистный (АПВ-1115 × Сочностебельная 2), ст.	60	8,5	13,7	-	1,93	201	2,6	17,9	-	1,10
АПВ-1115 × Кудесница	57	4,2	5,2	-4,4	3,33	212	3,6	21,3	11,8	1,12
АПВ-1115 × Светлопленчатая 2	58	11,5	8,4	-3,3	2,00	211	6,7	23,1	11,0	1,25
АПВ-1115 × Светлопленчатая 4	57	11,8	7,5	-5,0	1,50	219	7,5	25,6	15,3	1,26
АПВ-1115 × Землярина	57	3,6	3,8	-5,0	11,00	209	1,1	18,9	10,0	1,04
АПВ-1115 × ЧТ-22	56	3,7	2,8	-6,7	2,00	217	20,1	33,3	14,2	2,02
Деметра × Светлопленчатая 4	54	5,9	6,9	-10,0	4,00	223	9,4	37,3	17,4	1,23
Деметра × Тополек 576	52	2,0	3,0	-13,3	2,00	211	4,9	30,9	10,9	1,12
Деметра × Яктик	50	1,6	1,2	-17,2	2,00	220	0,9	29,8	15,8	1,02
Деметра × ЧСС-2	51	1,0	1,5	-15,0	2,00	212	1,3	28,3	11,4	1,03
Джетта × ЧСС-2	56	-6,7	0,9	-6,7	0,56	218	4,3	38,8	14,6	1,09
Джетта × Яктик	57	-5,0	3,6	-5,0	0,70	230	5,5	42,4	21,1	1,11
Джетта × ЧТ-22	59	-1,7	3,5	-1,7	0,83	216	19,6	51,2	13,7	1,47
Среднее	56	3,1	4,8	-7,8	2,60	215	6,7	30,7	13,9	1,22
НСР ₀₅	3					11				
Гибриды, полученные на основе ЦМС-линий:										
АПВ-1115	58	7,2	6,9	-4,9	3,63	212	6,9	23,3	12,4	1,30
Деметра	52	3,1	3,7	-13,5	2,50	218	5,1	32,7	14,7	1,10
Джетта	57	-4,4	2,7	-4,4	0,70	221	9,8	44,1	16,5	1,22

Таблица 3. Гетерозис и степень доминирования у сорго-суданковых гибридов по признакам «облиственность» и «урожайность зеленой массы» (2020–2022 гг.)

Гибрид	шт.	Облиственность				Урожайность зеленой массы				
		гетерозис, %			h _p	г/м ²	гетерозис, %			h _p
		Г _{ист.}	Г _{гип.}	Г _{конк.}			Г _{ист.}	Г _{гип.}	Г _{конк.}	
Густолистный (АПВ-1115 × Сочностебельная 2), ст.	9	3,7	4,7	-	3,00	4565	91,2	99,0	-	12,60
АПВ-1115 × Кудесница	11	24,5	25,2	21,9	23,33	5376	59,1	92,7	17,8	2,69
АПВ-1115 × Светлопленчатая 2	14	48,2	51,8	50,5	11,25	5949	86,8	120,9	30,3	3,81
АПВ-1115 × Светлопленчатая 4	12	19,0	24,9	27,2	3,00	4640	37,8	66,7	1,6	2,09
АПВ-1115 × Землярина	11	14,9	19,3	20,1	3,00	4392	34,8	60,9	-3,8	2,07
АПВ-1115 × ЧТ-22	13	38,1	41,2	39,8	9,60	5320	81,4	107,3	16,5	4,26
Деметра × Светлопленчатая 4	10	0,0	17,6	7,5	1,00	4389	30,4	86,1	-3,8	1,51
Деметра × Тополек 576	10	22,4	31,9	7,5	2,57	4115	28,5	80,8	-9,9	1,49
Деметра × Яктик	10	22,0	32,6	9,3	2,38	3557	22,1	66,9	-22,1	1,41
Деметра × ЧСС-2	10	18,2	30,3	9,3	1,98	4107	35,9	87,9	-10,0	1,65
Джетта × ЧСС-2	10	14,8	17,4	11,1	4,43	3813	26,2	59,8	-16,5	1,62
Джетта × Яктик	10	14,8	19,2	11,1	3,00	4587	57,4	96,7	0,5	2,44
Джетта × ЧТ-22	12	22,1	24,9	23,7	6,00	5720	95,1	144,3	25,3	3,36
Среднее	11	20,2	26,2	19,9	5,73	4656	52,8	90,0	2,2	3,15
НСР ₀₅	1	-	-	-	-	732	-	-	-	-
Гибриды, полученные на основе ЦМС-линий:										
АПВ-1115	12	24,7	27,9	31,9	8,86	5040	65,2	91,3	12,5	4,59
Деметра	10	15,7	28,1	8,4	1,98	4042	29,2	80,4	-11,5	1,51
Джетта	11	17,3	20,5	15,3	4,48	4707	59,6	100,3	3,1	2,47

У изучаемых сорго-суданковых гибридов содержание сухого вещества варьировало от 20,2 (АПВ-1115 × Светлопленчатая 2) до 23,7 % (Деметра × Светлопленчатая 4). В среднем, наибольшие величины этого показателя отмечены у гибридов, полученных на основе ЦМС-линии Деметра, – 21,5 %, а у гибридов на основе АПВ-1115 и Джетта – близкие значения (20,8...20,9 %). Самый высокий конкурсный гетерозис был у гибрида Деметра × Светлопленчатая 4 (16,2 %) и АПВ-1115 × ЧТ-22 (6,0 %). У остальных он не превышал 4 %.

Высокие значения истинного и гипотетического гетерозиса отмечены у гибридов с линией Деметра (26,2 и 14,3 % соответственно), характеризующейся невысоким содержанием сухого вещества (8,6 %), значительно ниже, чем у линии АПВ-1115 (19,0 %). Степень доминирования указывает на сверхдоминирование у гибридов с линией Деметра ($h_p=1,41$) и Джетта ($h_p=1,64$) и частичное доминирование больших значений – у гибридов с линией АПВ-1115 ($h_p=0,49$) (табл. 4).

Таким образом, при подборе пар для гибридизации следует учитывать, что наследование носит доминантный характер. Однако, при высоких значениях у родителей гибридов могут не проявить истинный гетерозис. При низких значениях – гибрид будет превосходить родительские формы, при этом, в наших исследованиях его значение не превысило 20...23 %.

Наибольшая среднегрупповая урожайность сухого вещества отмечена у гибридов с линией АПВ-1115 (1045 г/м²) с содержанием сухого вещества 20,2 % и урожайностью зеленой массы за 2 укоса 5040 г/м². Гибриды АПВ-1115 × Кудесница, АПВ-1115 × ЧТ-22, Джетта × ЧТ-22, АПВ-1115 × Светлопленчатая 2 с урожайностью сухого вещества 1116...1202 г/м² значительно превысили стандарт на 184...270 г/м², или 19,7...29,0 %.

Питательность корма определяется его качественным составом сухого вещества, при этом, наибольшую ценность представляет белок [9, 12]. В селекционной работе следует учитывать обратную связь этого показателя с урожайностью. Это подтверждается проведенными нами ранее исследованиями, в результате которых наблюдали отрицательный коэффициент корреляции между содержанием сырого протеина и урожайностью зеленой массы ($r=-0,18$) [12].

Таблица 4. Урожайность сухого вещества, гетерозис и степень доминирования у сорго-суданковых гибридов по признаку «содержание сухого вещества» (2020–2022 гг.)

Гибрид	Содержание сухого вещества					Урожайность сухого вещества, г/м ²
	%	гетерозис, %			h _p	
		Г _{ист.}	Г _{гип.}	К _{конк.}		
Густолистный (АПВ-1115 × Сочностебельная 2), ст.	20,4	-7,5	-0,6	-	0,46	932
АПВ-1115 × Кудесница	20,8	-4,8	1,7	1,7	0,63	1116
АПВ-1115 × Светлопленчатая 2	20,2	-12,1	-3,8	-1,1	0,30	1202
АПВ-1115 × Светлопленчатая 4	20,6	-8,2	-0,7	0,7	0,46	954
АПВ-1115 × Землярина	20,8	-9,2	-0,7	2,0	0,46	915
АПВ-1115 × ЧТ-22	21,6	-6,4	2,7	6,0	0,64	1152
Деметра × Светлопленчатая 4	23,7	5,9	26,2	16,2	1,18	1041
Деметра × Тополек 576	20,7	7,9	20,3	1,1	1,39	850
Деметра × Яктик	21,0	6,0	19,9	2,7	1,26	746
Деметра × ЧСС-2	20,8	13,4	23,9	1,6	1,79	852
Джетта × ЧСС-2	20,9	14,3	19,8	2,4	2,54	797
Джетта × Яктик	21,1	10,5	18,3	3,5	1,79	969
Джетта × ЧТ-22	20,5	-11,4	3,2	0,4	0,60	1172
Среднее	21,0	-0,1	10,0	3,1	1,04	977
НСР ₀₅	0,9	-	-	-	-	149
Гибриды, полученные на основе ЦМС-линий:						
АПВ-1115	20,7	-12,1	-3,8	-1,1	0,49	1045
Деметра	21,6	14,3	26,2	16,2	1,41	872
Джетта	20,8	-8,0	-0,2	1,9	1,64	980

Таблица 5. Сбор переваримого протеина, гетерозис и степень доминирования у сорго-суданковых гибридов по признаку «содержание сырого протеина» (2020–2022 гг.)

Гибриды	Содержание сырого протеина					Сбор переваримого протеина, г/м ²
	%	гетерозис, %			h_p	
		$\Gamma_{ист.}$	$\Gamma_{гип.}$	$\Gamma_{конк.}$		
Густолистный (АПВ-1115 × Сочностебельная 2), ст.	8,0	-16,3	-13,5	-	-1,55	57
АПВ-1115 × Кудесница	9,5	-1,0	6,0	18,3	0,93	80
АПВ-1115 × Светлопленчатая 2	9,2	-4,2	2,5	14,5	0,68	84
АПВ-1115 × Светлопленчатая 4	8,3	-13,0	-8,3	4,0	-0,28	60
АПВ-1115 × Землярина	8,4	-12,2	-5,2	4,9	0,18	58
АПВ-1115 × ЧТ-22	8,2	-14,2	-0,1	2,5	0,50	72
Деметра × Светлопленчатая 4	8,9	3,8	3,8	11,5	32,50	71
Деметра × Тополек 576	8,3	-13,4	-8,9	3,4	-0,34	53
Деметра × Яктик	8,6	-18,3	-10,3	7,0	-0,02	48
Деметра × ЧСС-2	8,3	-13,2	-8,7	3,6	-0,33	54
Джетта × ЧСС-2	9,7	1,3	9,0	20,9	1,09	59
Джетта × Яктик	10,3	-1,9	10,0	28,4	0,91	76
Джетта × ЧТ-22	6,4	-22,1	-15,1	-20,1	-0,34	57
Среднее	8,6	-9,6	-3,0	8,2	2,61	64
НСР ⁰⁵	1,0	-	-	-	-	11
Гибриды, полученные на основе ЦМС-линий:						
АПВ-1115	6,4	-22,1	-15,1	-20,1	0,08	69
Деметра	10,3	8,2	10,0	28,4	7,95	57
Джетта	8,6	-10,1	-3,1	8,8	0,55	64

У сорго-суданковых гибридов содержание сырого протеина достигало 6,4...10,3 % (табл. 5). Наибольшее содержание сырого протеина (9,2...10,3 %) было у гибридов АПВ-1115 × Светлопленчатая 2, АПВ-1115 × Кудесница, Джетта × ЧСС-2, Джетта × Яктик, превысившие стандарт на 1,2...2,3 % ($\Gamma_{конк.} = 14,5...28,42$ %).

Превышение над среднеродительским значением отмечено у 5 из 13 гибридов, превышение над большим родителем – только у двух (Деметра × Светлопленчатая 4 – 3,8 % и Джетта × ЧСС-2 – 1,3 %). Содержание сырого протеина у линии АПВ-1115 (9,6 %) выше, чем у Деметры (8,6 %) и Джетты (8,2 %), и ни один из гибридов, полученных на ее основе, не превысил это значение.

Степень доминирования указывает на различное наследование признака. Но в среднем по гибридам наблюдается частичное доминирование больших или меньших значений. Исключение составили гибриды Густолистный (АПВ-1115 × Сочностебельная 2) ($h_p = -1,55$) – гибридная депрессия, АПВ-1115 × Кудесница ($h_p = 0,93$), Джетта × Яктик ($h_p = 0,91$) – неполное доминирование больших значений и Деметра × Светлопленчатая 4 ($h_p = 32,5$) – сверхдоминирование. Таким образом, чем больше содержание сырого протеина уродительских форм, тем выше значения у гибридов, полученных на их основе.

Сбор переваримого протеина имел значения от 49 до 84 г/м². Наибольшие средне-групповые значения отмечены у гибридов, полученных на основе ЦМС-линии АПВ-1115 (69 г/м²) и Джетты (64 г/м²). Выделяются гибриды АПВ-1115 × Кудесница (80 г/м²), АПВ-1115 × Светлопленчатая 2 (84 г/м²) с урожайностью зеленой массы 5376 и 5949 г/м² и содержанием сырого протеина 9,5 и 9,2 % соответственно.

По результатам исследований по урожайности зеленой массы, сухого вещества и сбору переваримого

протеина наиболее перспективными оказались гибриды АПВ-1115 × Кудесница и АПВ-1115 × Светлопленчатая 2. АПВ-1115 × Светлопленчатая 2 – это гибрид Добрыня, внесенный в Государственный реестр селекционных достижений с 2023 г. и рекомендованный для возделывания на зеленый корм и силос в Центрально-Черноземном, Северо-Кавказском и Нижне-Волжском регионе РФ. АПВ-1115 × Кудесница – гибрид Гордей, переданный на Государственное сортоиспытание с 2023 г.

Выводы. У сорго-суданковых гибридов наблюдались различный характер наследования признаков: продолжительность периода «всходы–выметывание» ($h_p = 0,6...11,0$), содержание сухого вещества ($h_p = 0,3...2,5$) – сверхдоминирование и частичное (неполное) доминирование родителей с большими значениями; высота растений ($h_p = 1,02...2,02$) и облиственность ($h_p = 1,00...23,33$) – доминирование и сверхдоминирование; урожайность зеленой массы ($h_p = 1,4...12,6$) – сверхдоминирование, независимо от цитоплазмы; содержание сырого протеина ($h_p = -1,6...32,5$) – от гибридной депрессии до сверхдоминирования.

Наибольшие эффекты гетерозиса отмечены у гибридов по высоте растений ($\Gamma_{ист.} = 0,9...20,01$ %, $\Gamma_{гип.} = 17,9...51,2$ %), облиственности ($\Gamma_{ист.} = 0...48,2$ %, $\Gamma_{гип.} = 17,4...51,8$ %) и урожайности зеленой массы ($\Gamma_{ист.} = 22,1...91,2$ %, $\Gamma_{гип.} = 59,8...144,3$ %).

Благодаря эффекту гетерозиса наибольшую урожайность зеленой массы, сухого вещества и сбор переваримого протеина сформировали сорго-суданковые гибриды АПВ-1115 × Кудесница – Гордей (5376; 1116 и 80 г/м² соответственно) и АПВ-1115 × Светлопленчатая 2 – Добрыня (5949; 1202 и 84 г/м²). Гибрид Добрыня внесен в Государственный реестр селекционных достижений, Гордей передан на Государственное сортоиспытание с 2023 г.

Литература.

1. Кибальник О. П. Использование эффекта гетерозиса в селекции сорго // Вестник НГАУ. 2019. № 2 (51). С. 15–24. doi: 10.31677/2072-6724-2019-51-2-15-24.
2. Капустин С. И., Володин А. Б., Капустин А. С. Гетерозисная селекция гибридов сорго и суданской травы // Таврический вестник аграрной науки. 2022. № 3 (31). С. 76–84.
3. Evaluation of fodder yield and fodder quality in sorghum and its interaction with grain yield under different water availability regimes / K. Somegowdaab, A. Vemula, J. Naravula, et al. // Current Plant Biology. 2021. Vol. 25. Article 100191. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214662820300724?via%3Dihub> (дата обращения: 06.08.2023). doi: 10.1016/j.cpb.2020.100191.
4. Эффекты гетерозиса у гибридов F1 сорго на основе цитоплазматической мужской стерильности / О. П. Кибальник, О. Б. Каменева, Е. А. Жук и др. // Зерновое хозяйство России. 2020. № 2 (68). С. 49–53. doi: 10.31367/2079-8725-2020-68-2-49-53.

5. Вертикова Е. А., Пыльнев В. В. Оценка сорго-суданковых гибридов для селекции в условиях Нижнего Поволжья // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2020. № 87. С. 48–54. doi: 10.21515/1999-1703-87-48-54.
6. Zeru Y., Chang J. Genetic diversity and estimation of heterosis of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) varieties and their hybrids for grain yield and other traits at, Baoding, Hebei province, China // International Journal of Agriculture Innovations and Research. 2020. No. 8. P. 279–289.
7. Beyaz R., Kir H. Physio-biochemical analyses in seedlings of sorghum-sudangrass hybrids that are grown under salt stress under in vitro conditions // Turkish Journal of Biochemistry. 2020. Vol. 45. No. 2. P. 177–184. URL: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/tjb-2018-0552/html> (дата обращения: 06.08.2023). doi: 10.1515/tjb-2018-0552.
8. Agroecological testing of sugar sorghum, Sudanese grass and sorghum-Sudanese hybrids in the natural conditions of the Novgorod region / E. Shkodina, O. Balun, S. I. Kapustin, et al. // Indo American journal of pharmaceutical science. 2019. Vol. 6. No. 7. P. 13810–13815. doi: 10.30766/2072-9081.2021.22.4.531-541.
9. Шишова Е. А., Ковтунов В. В., Ковтунова Н. А. Подбор родительских пар и изучение новых сорго-суданковых гибридов // Зерновое хозяйство России. 2020. № 4 (70). С. 65–68. doi: 10.31367/2079-8725-2020-70-4-65-68.
10. Метлина Г. В., Васильченко С. А., Ковтунов В. В. Расход влаги сортами сорго зернового в зависимости от норм высевки и способов посева в условиях южной зоны Ростовской области // Зерновое хозяйство России. 2022. Т. 14. № 6. С. 97–102. doi: 10.31367/2079-8725-2022-83-6-97-102.
11. Feed quality of new Sudan grass varieties / S. I. Kapustin, A. S. Kapustin, N. V. Samokish, et al. // Journal of Agriculture and Nature. 2022. Vol. 25. No. 2. P. 400–405. doi: 10.18016/ksutarimdog.vi.916295.
12. Параметры адаптивности и изменчивости урожайности и качества зеленой массы суданской травы / Н. А. Ковтунова, А. Е. Романюкин, В. В. Ковтунов и др. // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2022. № 6. С. 58–62. doi: 10.31857/2500-2082-2022/6/58-62.
13. Вертикова Е. А., Пыльнев В. В. Использование гетерозиса в селекции сорговых культур для условий Нижнего Поволжья // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2021. № 91. С. 51–57. doi: 10.21515/1999-1703-91-51-57.
14. Asadi M., Eshghizadeh H. R. Comparison of growth responses in sorghum genotypes and corn grown in arid regions under different levels of water and nitrogen supplies // Acta Agrobotica. 2020. Vol. 73. No. 4. P. 272–278. doi: 10.5586/aa.7342.
15. Genotype selection for grain yield of sorghum through generalized linear mixed model / M. Tesfa, T. Zewotir, S. A. Derese, et al. // Agronomy. 2023. Vol. 13. No. 3. Article 852. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/13/3/852> (дата обращения: 06.08.2023). doi: 10.3390/agronomy13030852.
16. Adebo J. A., Kesa H. Evaluation of nutritional and functional properties of anatomical parts of two sorghum (*Sorghum bicolor*) varieties // Heliyon. 2023. Vol. 9. No. 6. Article e17296. URL: [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(23\)04504-8?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2405844023045048%3Fshowall%3Dtrue](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(23)04504-8?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2405844023045048%3Fshowall%3Dtrue) (дата обращения: 06.08.2023). doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17296.

References

1. Kibal'nik O.P. [Use of the heterosis effect in sorghum breeding]. Vestnik NGAU. 2019;(2):15-24. Russian. doi: 10.31677/2072-6724-2019-51-2-15-24.
2. Kapustin SI, Volodin AB, Kapustin AS. [Heterotic breeding of sorghum and Sudan grass hybrids]. Tavricheskii vestnik agrarnoi nauki. 2022;(3):76-84. Russian.
3. Somegowdaab K, Vemula A, Naravula J, et al. Evaluation of fodder yield and fodder quality in sorghum and its interaction with grain yield under different water availability regimes. Current Plant Biology [Internet]. 2021 [cited 2023 Aug 6];25: Article 100191. Available from: https://www.researchgate.net/publication/347901620_Evaluation_of_fodder_yield_and_fodder_quality_in_sorghum_and_its_interaction_with_grain_yield_under_different_water_availability_regimes. doi: 10.1016/j.cpb.2020.100191.
4. Kibal'nik O.P., Kameneva O.B., Zhuk E.A., et al. [Effects of heterosis of the sorghum hybrids F1 based on cytoplasmic male sterility]. Zernovoe khozyaistvo Rossii. 2020;(2):49-53. Russian. doi: 10.31367/2079-8725-2020-68-2-49-53.
5. Vertikova EA, Pyl'nev VV. [Evaluation of sorghum-Sudanese hybrids for breeding under the conditions of the Lower Volga region]. Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2020;(87):48-54. Russian. doi: 10.21515/1999-1703-87-48-54.
6. Zeru Y, Chang J. Genetic diversity and estimation of heterosis of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) varieties and their hybrids for grain yield and other traits at, Baoding, Hebei province, China. International Journal of Agriculture Innovations and Research. 2020;(8):279-289.
7. Beyaz R, Kir H. Physio-biochemical analyses in seedlings of sorghum-sudangrass hybrids that are grown under salt stress under in vitro conditions. Turkish Journal of Biochemistry [Internet]. 2020 [cited 2023 Aug 6];45(2):177-84. Available from: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/tjb-2018-0552/html>. doi: 10.1515/tjb-2018-0552.
8. Shkodina E, Balun O, Kapustin S, et al. Agroecological testing of sugar sorghum, Sudanese grass and sorghum-Sudanese hybrids in the natural conditions of the Novgorod region. Indo American journal of pharmaceutical science. 2019;6(7):13810-15. doi: 10.30766/2072-9081.2021.22.4.531-541.
9. Shishova EA, Kovtunov VV, Kovtunova NA. [Selection of parental pairs and study of new sorghum-Sudan grass hybrids]. Zernovoe khozyaistvo Rossii. 2020;(4):65-8. Russian. doi: 10.31367/2079-8725-2020-70-4-65-68.
10. Metlina GV, Vasil'chenko SA, Kovtunov VV. [Moisture consumption by grain sorghum varieties depending on seeding rates and sowing methods in the southern part of the Rostov region]. Zernovoe khozyaistvo Rossii. 2022;14(6):97-102. Russian. doi: 10.31367/2079-8725-2022-83-6-97-102.
11. Kapustin SI, Kapustin AS, Samokish NV, et al. Feed quality of new Sudan grass varieties. Journal of Agriculture and Nature. 2022;25(2):400-5. doi: 10.18016/ksutarimdog.vi.916295.
12. Kovtunova NA, Romanyukin AE, Kovtunov VV, et al. [Parameters of adaptability and variability of productivity and quality of green mass of Sudanese grass]. Vestnik Rossijskoi sel'skokhozyaistvennoi nauki. 2022;(6):58-62. Russian. doi: 10.31857/2500-2082-2022/6/58-62.
13. Vertikova EA, Pyl'nev VV. [Use of heterosis in sorghum breeding for the conditions of the Lower Volga region]. Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021;(91):51-7. Russian. doi: 10.21515/1999-1703-91-51-57.
14. Asadi M, Eshghizadeh HR. Comparison of growth responses in sorghum genotypes and corn grown in arid regions under different levels of water and nitrogen supplies. Acta Agrobotica. 2020;73(4):272-8. doi: 10.5586/aa.7342.
15. Tesfa M, Zewotir T, Derese SA, et al. Genotype selection for grain yield of sorghum through generalized linear mixed model. Agronomy [Internet]. 2023 [cited 2023 Aug 6];13(3): Article 852. Available from: <https://www.mdpi.com/2073-4395/13/3/852>. doi: 10.3390/agronomy13030852.
16. Adebo JA, Kesa H. Evaluation of nutritional and functional properties of anatomical parts of two sorghum (*Sorghum bicolor*) varieties. Heliyon [Internet]. 2023 [cited 2023 Aug 6];9(6): Article e17296. Available from: [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(23\)04504-8?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2405844023045048%3Fshowall%3Dtrue](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(23)04504-8?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2405844023045048%3Fshowall%3Dtrue). doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17296.