

СЕЛЕКЦИЯ И СЕМЕНОВОДСТВО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ

УДК 633.174:631.524.82.1

DOI: 10.31367/2079-8725-2025-97-2-5-12

НАСЛЕДОВАНИЕ ВЫСОТЫ РАСТЕНИЙ В КОМБИНАЦИЯХ F₁-F₂ СОРГО ЗЕРНОВОГО, ПОЛУЧЕННЫХ МЕЖДУ РОДИТЕЛЬСКИМИ ФОРМАМИ, ДАЛЕКИМИ ПО ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКОМУ ПРОИСХОЖДЕНИЮ

В. В. Ковтунов^{1,2}, доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории селекции и семеноводства сорго, kowtunow85@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-7510-7705;
П. И. Костылев¹, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории селекции и семеноводства риса, p-kostylev@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4371-6848;
Н. А. Ковтунова¹, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории селекции и семеноводства сорго, n-beseda@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0409-5855;
Ю. В. Репешко¹, агроном лаборатории селекции и семеноводства сорго, repeshko@bk.ru, ORCID ID: 0000-0001-7470-6338

¹ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской»,

347740, Ростовская обл., г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3, e-mail: vniizk@mail.ru;

²ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»,

344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 2

В селекционных программах по сорго зерновому большое внимание уделяется признаку «высота растений». Новые сорта и гибриды данной культуры должны быть технологичны и в первую очередь удовлетворять требованиям для механизированного возделывания по высоте растений. В связи с этим целью проведенных исследований являлось установление закономерностей наследования высоты растений в гибридных комбинациях первого и второго поколения сорго зернового, полученных между далекими по эколого-географическому происхождению образцами. Для создания нового, приспособленного к механизированному возделыванию селекционного материала в 2020 г. в схему гибридизации были включены адаптированные к местным условиям сорта селекции ФГБНУ «АНЦ «Донской» Лучистое и Атаман, а также угандийские сорта Seso 1 и Narosorg 1. Исследования проводили в 2020–2022 гг. на опытных полях ФГБНУ «АНЦ «Донской». Оценку высоты растений производили в фазу полной спелости растений. Для анализа наследования признака у гибридов F₁ проводили расчет степени доминирования, значений истинного и гипотетического гетерозиса. Гибридологический анализ высоты растений у гибридов F₂ выполняли с использованием программы поиска моделей расщепления Полиген А. В гибридных комбинациях сорго зернового первого поколения, полученных между удаленными в эколого-географическом отношении родительскими формами, по признаку «высота растений» отмечено сверхдоминирование признака (h_r = 7,8–61,0), проявление истинного (24,2–37,1 %) и гипотетического (25,3–39,8 %) гетерозиса. Анализ гибридов второго поколения позволил установить различия родительских форм по двум парам генов, что позволяет в большинстве случаев проводить комбинирование с генами других количественных признаков.

Ключевые слова: сорго зерновое, сорт, образец, наследование, высота растения.

Для цитирования: Ковтунов В. В., Костылев П. И., Ковтунова Н. А., Репешко Ю. В. Наследование высоты растений в комбинациях F₁-F₂ сорго зернового, полученных между родительскими формами, далекими по эколого-географическому происхождению // Зерновое хозяйство России. 2025. Т. 17, № 2. С. 5–12. DOI: 10.31367/2079-8725-2025-97-2-5-12.



INHERITANCE OF 'PLANT HEIGHT' IN F₁-F₂ GRAIN SORGHUM COMBINATIONS OBTAINED BETWEEN PARENTAL FORMS DISTANT IN ECOLOGICAL AND GEOGRAPHICAL ORIGIN

V. V. Kovtunov^{1,2}, Doctor of Agricultural Sciences, leading researcher of the laboratory for sorghum breeding and seed production, kowtunow85@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-7510-7705;
P. I. Kostylev¹, Doctor of Agricultural Sciences, professor, main researcher of the laboratory for rice breeding and seed production, p-kostylev@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4371-6848;
N. A. Kovtunova¹, Candidate of Agricultural Sciences, leading researcher of the laboratory for sorghum breeding and seed production, n-beseda@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0409-5855;
Yu. V. Repeshko¹, agronomist of the laboratory for sorghum breeding and seed production, repeshko@bk.ru, ORCID ID: 0000-0001-7470-6338

¹FSBSI Agricultural Research Center "Donskoy",

347740, Russia, Rostov region, Zernograd, Nauchny Gorodok Str., 3; e-mail: vniizk30@mail.ru;

²FSBEI HE "Donskoy State Technical University"

344003, Rostov region, Rostov-on-Don, Gagarin Sq., 2

In the grain sorghum breeding programs, much attention is paid to the trait 'plant height'. New varieties and hybrids of this crop must be technologically advanced and, above all, meet the requirements for mechanized cultivation according to plant height. In this regard, the purpose of the current research was to establish the patterns of inheritance of 'plant height' in grain sorghum hybrid combinations of the first and second generation obtained between samples that were of distant ecological and geographical origin. In order to develop new breeding material adapted to mechanized cultivation, in the hybridization scheme of 2020 there were included varieties 'Luchistoye' and 'Ataman' of the FSBSI "ARC "Donskoy", adapted to local conditions, as well as the Ugandan varieties 'Seso 1' and 'Narosorg 1'. The study was carried out on the experimental plots of the FSBSI "ARC "Donskoy" in 2020–2022. The trait 'plant height' was estimated at the stage of full plant maturity. To analyze the inheritance of the trait in F_1 hybrids, there have been estimated dominance degrees, true and hypothetical heterosis values. Hybridological analysis of plant height in F_2 hybrids was conducted using Polygen A segregation model search program. In grain sorghum hybrid combinations of the first generation, obtained between ecologically and geographically distant parental forms, there was an overdominance of the trait 'plant height' ($hp = 7.8-61.0$), as well as the manifestation of true (24.2–37.1 %) and hypothetical (25.3–39.8 %) heterosis. The analysis of second-generation hybrids made it possible to establish differences between parental forms in two pairs of genes, which allowed in most cases to combine them with genes of other quantitative traits.

Keywords: grain sorghum, variety, sample, inheritance, plant height.

Введение. Население мира продолжает расти и, как ожидается, достигнет 9,7 млрд человек к 2050 году. Кроме того, из-за изменения климата происходит глобальный рост температуры, а засухи и наводнения стали более частыми и широко распространенными явлениями (Rivero et al., 2022). Таким образом, в условиях изменяющегося климата существует необходимость в разработке решений для устойчивого обеспечения населения продовольствием и сырьем для переработки. Одним из таких решений будет использование культур с высокой стрессоустойчивостью, которые являются как источниками продуктов питания и кормов, так и источником сырья для перерабатывающей промышленности. В частности, представители трибы Andropogoneae, включая сорго, считаются перспективными видами (Takanashi, 2023).

Сорго (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) по посевной площади среди зерновых культур занимает пятое место в мире после таких сельскохозяйственных культур, как кукуруза, рис, пшеница, ячмень (Boyles et al., 2019). Оно отличается высокой устойчивостью к засухе и может возделываться в засушливых условиях, при которых другие культуры нельзя выращивать из-за недостатка влаги (Yamaguchi et al., 2016). Сорго имеет широкое распространение в странах Африки, Азии, Южной и Северной Америки, в Австралии и Европе. Зерно сорго является питанием для людей, сырьем для перерабатывающих предприятий, кормом для животных. В странах Африки к югу от Сахары и в регионах Южной Азии примерно половина населения использует сорго зерновое как основной продукт питания (Boyles et al., 2019). В России посевная площадь сорго по годам сильно варьирует, и в период с 2012 по 2021 г. она составляла от 54,7 до 228,7 тыс. га (Ковтунов, 2024).

Современные низкорослые растения зернового сорго произошли от высокорослых тропических форм. В регионах, где уборка урожая зерна сорго производится вручную, оно может достигать трех-четырёх метров в высоту. В результате индустриализации сельского хозяйства и внедрения комбайнов высота большинства зерновых культур значительно сократилась за счет активного отбора наиболее

низкорослых форм. В связи с этим в странах с механизированной уборкой предпочтительны более низкорослые сорта и гибриды сорго высотой около 0,8–1,5 м (George Jaeggli et al., 2021). Это уменьшает риски полегания и облегчает комбайновый сбор урожая (Olson et al., 2012).

Снижение высоты растений обычно достигается путем интрогрессии по крайней мере трех из четырех основных генов карликовости $dwarf$ (Dw_1 , Dw_2 , Dw_3 , Dw_4). Эти гены уменьшают длину междоузлий и, следовательно, влияют на длину стебля до флагового листа в целом. Отдельные гены могут уменьшать высоту растения до 50 см. Несмотря на их аддитивное действие, по мере добавления большего количества генов карликовости снижение высоты растений уменьшается. Отмечаются значительные различия в высоте даже среди сорго с одинаковым количеством генов карликовости. Это связано с существованием модифицирующего комплекса и второстепенных генов, которые в основном влияют на длину цветоноса (длину стебля между флаговым листом и основанием метелки) и длину метелки (George Jaeggli et al., 2021).

Как и в случае с другими злаками, уменьшение высоты растения сорго может оказывать влияние на урожайность зерна. Сообщалось как об общем влиянии высоты на урожайность зерна (Jordan et al., 2003), так и об отрицательном влиянии отдельных генов карликовости на урожайность с растения (George Jaeggli et al., 2021).

В связи с этим исследования, направленные на изучение высоты растения сорго и ее генетической основы, являются актуальными.

При подборе исходных родительских форм для проведения скрещиваний опираются на различные принципы, один из которых – принцип эколого-географической удаленности. Данный принцип основан на том, что в различных почвенно-климатических условиях в результате естественного и искусственного отборов формируются разные экотипы растений. Проявление гетерозиса в этом случае обусловлено генетическими различиями родительских образцов, возникших в результате географической изоляции (Ковтунов, 2024).

Новизной исследований являются установленные закономерности наследования признака «высота растения» у гибридов сорго зернового, полученных в результате гибридизации сортов, географически далеких по происхождению.

Цель исследований – установить закономерности наследования высоты растений в гибридных комбинациях первого и второго поколения сорго зернового, полученных между далекими по эколого-географическому происхождению образцами.

Материалы и методы исследований. Полевые опыты проводили на селекционном поле научного севооборота лаборатории селекции и семеноводства сорго ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской». Период исследований – 2020–2022 годы. Почва опытного участка представлена черноземом обыкновенным, по механическому составу глинистая и легкоглинистая с преимущественным содержанием лессовидной фракции (Метлина и др., 2024).

Согласно классификации влагообеспеченности по Г. Т. Селянину (Ионова и др., 2019) погодные условия 2021 г. характеризовались засушливостью климата. ГТК за период вегетации культуры (май–сентябрь) находился на уровне 0,82. В 2020 и 2022 гг. погодноклиматические условия были очень засушливыми (гидротермический коэффициент за период май–сентябрь в 2020 г. составил 0,68, в 2022 г. – 0,52).

Посев родительских образцов и гибридных комбинаций проводили селекционной сеялкой Клен-4,2 в оптимальные сроки (вторая де-

када мая). Норма высева семян – 280 тыс. шт. на 1 гектар, глубина посева – 5–6 см, ширина междурядья – 70 см. Площадь делянки в питомнике F_1 – 4,9 м², в питомнике F_2 – 14,7 м². Оценку высоты растений выполняли в фазу полной спелости растений (первая декада сентября).

Для расчета истинного и гипотетического гетерозиса использовали формулы, описанные Д. С. Омаровым (1975), степени доминирования – Мазер и Джинкс (1985).

Для гибридологического анализа высоты растений у гибридов F_2 была использована программа поиска моделей расщепления Полиген А.

Результаты и их обсуждение. В результате заключенного меморандума о сотрудничестве в научной сфере между ФГБНУ «АНЦ «Донской» и Национальной аграрной научной организацией «НАРО» Республики Уганда были интродуцированы сорта зернового сорго Seso 1, Seso 3, Narosorg 1, Narosorg 2, Narosorg 3, Narosorg 4, Epuripur селекции NaSARRI.

Для создания нового, приспособленного к механизированному возделыванию селекционного материала в 2020 г. в схему гибридизации были включены адаптированные к местным условиям сорта селекции ФГБНУ «АНЦ «Донской» Лучистое и Атаман, а также угандийские сорта Seso 1 и Narosorg 1, отличающиеся от других сортов из Уганды наименьшей высотой растений. В среднем за 2020–2022 гг. высота растений у сорта Seso 1 составила 129 см, Narosorg 1 – 125 см, Атаман – 126 см, Лучистое – 117 см (табл. 1).

Таблица 1. Высота растений родительских форм гибридов сорго зернового (2020–2022 гг.)
Table 1. Plant height of parental forms of grain sorghum hybrids (2020–2022)

Название родительской формы	Высота растений, см			
	2020 г.	2021 г.	2022 г.	среднее
Seso 1	150	121	116	129
Narosorg 1	146	112	116	125
Атаман	141	124	112	126
Лучистое	131	120	101	117

Гибрид F_1 , полученный от скрещивания сорта Лучистое (материнская форма) с средней высотой растения 120 см и инорайонного сорта Narosorg 1 (отцовская форма) с параметрами анализируемого признака на уровне 112 см, характеризовался проявлением гетерозиса (высота растения – 149 см) по отношению к родительским образцам. Привлечение в гибридизацию сортов Лучистое и Seso 1 привело к получению гибридной формы с высотой растений 151 см, что также превышало исходные образцы (120 и 121 см соответственно) (рис. 1).

При скрещивании сорта Атаман, обладающего высотой растения 124 см, с сортом Narosorg 1 в F_1 отмечено формирование расте-

ния, достигающего высоты 165 см. Привлечение в гибридизацию сорта Атаман и угандийского сорта Seso1 привело к созданию гибрида первого поколения с высотой растения 170 см (рис. 2).

Проведенный расчет степени доминирования позволил установить проявление сверхдоминирования признака «высота растения» по всем полученным комбинациям. Значения степени доминирования варьировали от 7,8 до 61,0. Наибольшие значения (31,7 и 61,0 соответственно) отмечены в комбинациях (Атаман × Seso 1 и Лучистое × Seso 1), где в качестве материнской формы привлечен угандийский сорт Seso 1 (табл. 2).

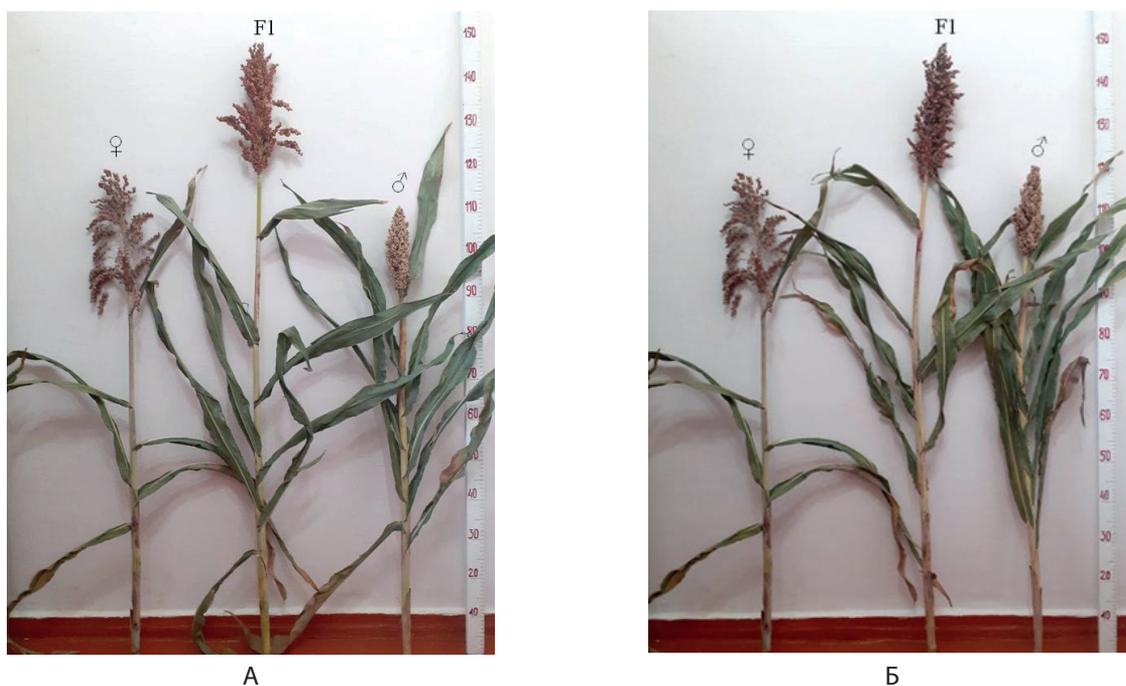


Рис. 1. Растение F₁ Лучистое × Narosorg 1 (А) и F₁ Лучистое × Seso 1 (Б) в сравнении с родительскими формами, 2021 год
Fig. 1. F₁ 'Luchistoe' × 'Narosorg 1' (A) and F₁ 'Luchistoe' × 'Seso 1' (B) in comparison with parental forms, 2021



Рис. 2. Растение F₁ Атаман × Narosorg 1 (А) и F₁ Атаман × Seso 1 (Б) в сравнении с родительскими формами, 2021 год
Fig. 2. F₁ 'Ataman' × 'Narosorg 1' (A) and F₁ 'Ataman' × 'Seso 1' (B) in comparison with parental forms, 2021

Таблица 2. Степень доминирования, истинный и гипотетический гетерозис по признаку «высота растения» в гибридных комбинациях F₁ (2021 г.)
Table 2. Dominance degree, true and hypothetical heterosis according to the trait 'plant height' in F₁ hybrid combinations (2021)

Гибридная комбинация	♀	♂	F ₁	hp	Г _{ист.} %	Г _{гип.} %
Лучистое × Narosorg 1	120	112	149	8,3	24,2	28,4
Лучистое × Seso 1	120	121	151	61,0	24,8	25,3
Атаман × Narosorg 1	124	112	165	7,8	33,1	39,8
Атаман × Seso 1	124	121	170	31,7	37,1	38,8

В результате анализа полученных гибридов F_1 по данному признаку выявлен положительный истинный и гипотетический гетерозис. Истинный гетерозис варьировал от 24,2 до 37,1 %, а гипотетический – от 25,3 до 39,8 %.

Проведенный в 2022 г. генетический анализ, осуществленный в программе Полиген А, позволил выявить у гибрида F_2 Лучистое × Narosorg 1 расщепление по двум парам генов с полным доминированием.

Взятые для скрещивания сорта сорго Лучистое и Narosorg 1 существенно (на 15,3 см) различались по высоте растений (101,2 и 116,4 см соответственно). Кривая распределения частот значений признака высоты у гибрида F_2 была симметричной, ее вершина располагалась в одном классе (114–121 см) с вершиной высокорослого родительского сорта Narosorg (рис. 3).

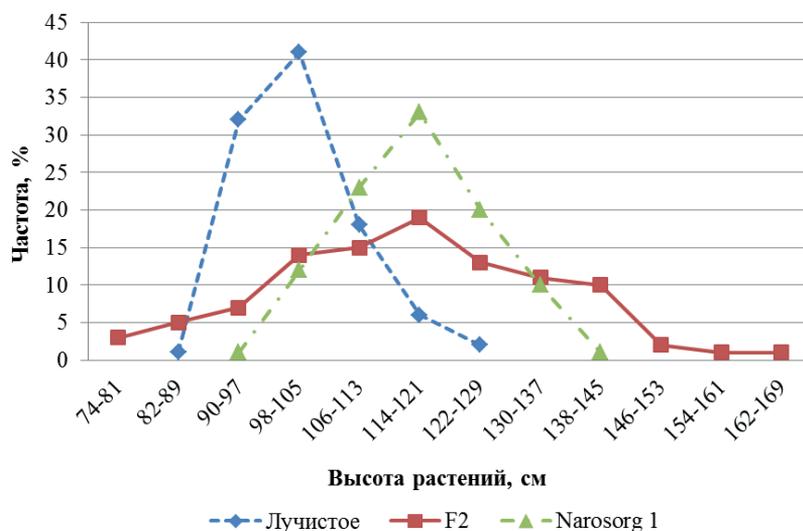


Рис. 3. Распределение частот значений признака «высота растений» у родительских форм и гибрида F_2 Лучистое × Narosorg 1 (2022 г.)
Fig. 3. Distribution of the values' frequency of the trait 'plant height' in parental forms and F_2 hybrid 'Luchistoe × Narosorg 1' (2022)

Степень доминирования ($h_r = 1,0$) указывает на преобладание выщепившихся растений с большой высотой. При этом имеются трансгрессивные формы с меньшим и большим значением признака, чем у родителей. Это свидетельствует о том, что родительские сорта имели в своем генотипе как доминантные, так и рецессивные гены, перекомбинирование

которых привело к появлению трансгрессий. На долю гибрида приходится по 1/16 частоты рецессивной родительской формы, что свидетельствует о дигенном расщеплении в соотношении 1:4:6:4:1. Сила гена равняется 7,64 см. Отличия исходных образцов по двум парам генов также отмечались у гибрида F_2 Лучистое × Seso 1 (рис. 4).

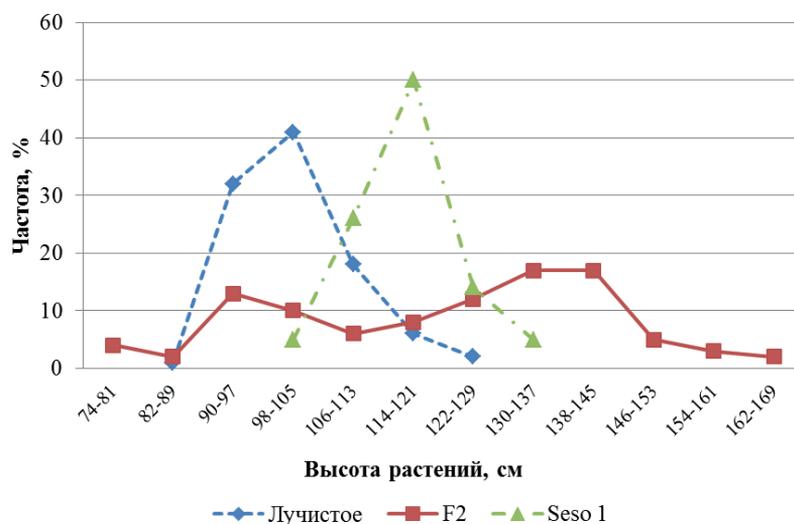


Рис. 4. Распределение частот значений признака «высота растений» у родительских форм и гибрида F_2 Лучистое × Seso 1 (2022 г.)
Fig. 4. Distribution of the values' frequency of the trait 'plant height' in parental forms and F_2 hybrid 'Luchistoe × Seso 1' (2022)

Однако кривая распределения частот в этой комбинации характеризовалась левосторонней асимметрией ($A_s = -0,61$), и двухвершинностью. Средняя высота растений у местной родительской формы Лучистое находилась на уровне 101,2 см, а у инорайнного сорта Seso 1 – 116,0 см. Меньшая вершина кривой гибрида была близка к вершине кривой рецессивной родительской формы Лучистое, а большая находилась значительно правее высокорослого родительского сорта Seso 1, что свидетельствует о сверхдоминировании большей величины признака ($h_p = 1,49$) и положительной трансгрессии. Сегрегация классов произошла в соотношении 1: 3: 3: 9. Средняя сила гена составила 30,0 см. При этом выщепилась небольшая часть низкорослых растений с высотой 75–80 см, которые представляют интерес для селекционных программ по культуре сорго.

Различия родительских сортов по аллельному состоянию двух генов были установлены и других двух гибридов, полученных от скрещивания сорта Атаман с сортами из Уганды. Средняя высота растений у сорта сорго Атаман составила 111,5 см, а у сортов

Seso 1 и Narosorg 1 – 116,0 и 116,4 см соответственно.

В гибридной комбинации F_2 Атаман × Narosorg 1 кривая распределения частот гибрида выходила за пределы изменчивости признака обоих исходных образцов с незначительным числом выщепившихся форм, характеризующихся более коротким стеблем, чем у Атамана, но большим числом высокорослых форм – выше Narosorg 1. Это указывает на трансгрессии, определенные тем, что у привлеченных в гибридизацию сортов были и доминантные, и рецессивные аллели генов высоты, но в разных локусах. Их перекомбинирование способствовало появлению 9/16 доли высокорослых растений с двумя доминантными генами и 1/16 – низкорослых с двумя рецессивными генами. Следовательно, расщепление происходило по двум парам генов. Кривая распределения частот обладает левосторонней асимметрией ($A_s = -0,35$), что свидетельствует о сверхдоминировании больших значений признака ($h_p = 5,03$). Расщепление происходило в соотношении 1:6:9 (рис. 5). Сила одного гена составила 24 см.

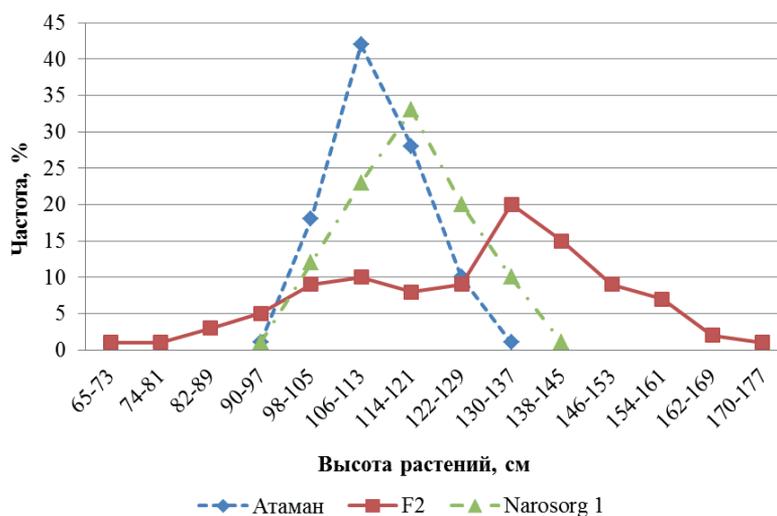


Рис. 5. Распределение частот значений признака «высота растений» у родительских форм и гибрида F_2 Атаман × Narosorg 1 (2022 г.)
Fig. 5. Distribution of the values' frequency of the trait 'plant height' in parental forms and F_2 hybrid 'Ataman × Narosorg 1' (2022)

Такое же расщепление в соотношении 1:6:9 определено у гибрида F_2 Атаман × Seso 1. Средняя вершина кривой распределения частот значений гибрида находилась на уровне

обоих родителей, а большая смещена вправо, представляя формы с наибольшим значением признака (рис. 6).

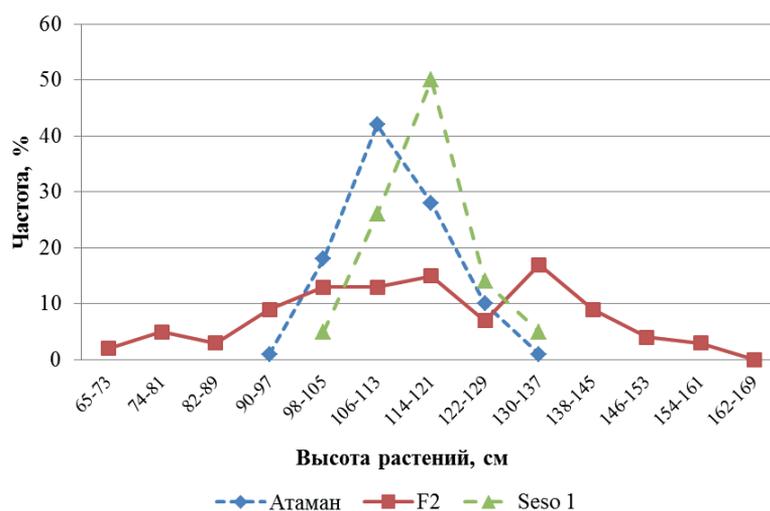


Рис. 6. Распределение частот значений признака «высота растений» у родительских форм и гибрида F₂ Атаман × Seso 1 (2022 г.)

Fig. 6. Distribution of the values' frequency of the trait 'plant height' in parental forms and F₂ hybrid 'Ataman × Seso 1'(2022)

Степень доминирования, равная 0,86, показывает неполное положительное доминирование. Замена обоих аллелей в рецессивном состоянии на доминантные будет способствовать увеличению среднего значения признака на 56 см.

Выводы.

1. У гибридов F₁ сорго зернового, полученных между удаленными родительскими формами в эколого-географическом отношении, по признаку «высота растений» отмечено сверхдоминирование признака ($h_p = 7,8-61,0$), проявление истинного (24,2–37,1 %) и гипотетического (25,3–39,8 %) гетерозиса.

2. Анализ гибридов F₂ позволил установить различия родительских форм по двум парам генов, что дает основание в значительном числе случаев проводить перекомбинирование с генами других количественных признаков.

3. В гибридных комбинациях второго поколения Лучистое × Narosorg 1, Лучистое × Seso 1, Атаман × Narosorg 1, Атаман × Seso 1 выделены низкорослые формы для последующего этапа селекционного процесса.

Финансирование. Исследования выполнены в рамках государственного задания № 0505-2025-0010 – ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской».

Библиографический список

- Ионова Е. В., Лиховидова В. А., Лобунская И. А. Засуха и гидротермический коэффициент увлажнения как один из критериев оценки степени ее интенсивности (обзор литературы) // Зерновое хозяйство России. 2019. № 6. С. 18–22.
- Ковтунов В. В. Селекционно-генетические аспекты повышения урожайности и улучшения качества зерна сорго зернового: дис. ... д-ра с.-х. наук. Зерноград, 2024. 412 с.
- Метлина Г. В., Васильченко С. А., Ашиев А. Р., Кравченко Н. С. Влияние сроков посева и норм высева сортов зимующего гороха на содержание белка и выход питательных веществ // Зерновое хозяйство России. 2024. № 1(16). С. 97–103. DOI: 10.31367/2079-8725-2024-90-1-97-103
- Boyles R. E., Brenton Z. W., Kresovich S. Genetic and genomic resources of sorghum to connect genotype with phenotype in contrasting environments // The Plant Journal. 2019. Vol. 97, P. 19–39.
- George Jaeggli B., Lefèvre Arbogast S., Hunt C., Cruickshank A., Jordan D. R. Tall 3-dwarfs: oxymoron or opportunity to increase grain yield in sorghum? // Planta. 2021. Vol. 253, Article number: 110.
- Jordan D. R., Tao Y., Godwin I. D., Henzell R. G., Cooper M., McIntyre C. L. Prediction of hybrid performance in grain sorghum using RFLP markers // Theor Appl Genet. 2003. Vol. 106, P. 559–567.
- Olson S.N., Ritter K., Rooney W., Kemanian A., McCarl B.A., Zhang Y. High biomass yield energy sorghum: Developing a genetic model for C4 grass bioenergy crops // Biofuels, Bioprod Biorefining. 2012. P. 640–655. DOI: 10.1002/bbb.1357
- Rivero R.M., Mittler R., Blumwald E., Zandalinas S.I. Developing climate-resilient crops: improving plant tolerance to stress combination // Plant J. 2022. Vol. 109, P. 373–389.
- Takanashi H. Genetic control of morphological traits useful for improving sorghum // Breeding Science. 2023. Vol. 73, P. 57–69. DOI: 10.1270/jsbbs.22069
- Yamaguchi M., Fujimoto H., Hirano K. Sorghum Dw1, an agronomically important gene for lodging resistance, encodes a novel protein involved in cell proliferation // Scientific Reports. 2016. Vol. 6, Article number: 28366.

References

- Ionova E. V., Likhovidova V. A., Lobunskaya I. A. Zasukha i gidrotermicheskii koeffitsient uvlazhneniya kak odin iz kriteriev otsenki stepeni ee intensivnosti (obzor literatury) [Drought and hydrothermal coefficient

of moisture as one of the criteria for estimating the degree of its intensity (literature review)] // *Zernovoe khozyaistvo Rossii*. 2019. № 6. S. 18–22.

2. Kovtunov V. V. Seleksionno-geneticheskie aspekty povysheniya urozhainosti i uluchsheniya kachestva zerna sorgo zernovogo [Breeding and genetic aspects of improving productivity and quality of grain sorghum]: dis. ... d-ra s.-kh. nauk. Zernograd, 2024. 412 с.

3. Metlina G. V., Vasil'chenko S. A., Ashiev A. R., Kravchenko N. S. Vliyanie srokov poseva i norm vyseva sortov zimuyushchego gorokha na sodержanie belka i vykhod pitatel'nykh veshchestv [The effect of sowing dates and seeding rates of winter pea varieties on protein percentage and yield of nutrients] // *Zernovoe khozyaistvo Rossii*. 2024. № 1(16). S. 97–103. DOI: 10.31367/2079-8725-2024-90-1-97-103

4. Boyles R. E., Brenton Z. W., Kresovich S. Genetic and genomic resources of sorghum to connect genotype with phenotype in contrasting environments // *The Plant Journal*. 2019. Vol. 97, P. 19–39.

5. George Jaeggli B., Lefèvre Arbogast S., Hunt C., Cruickshank A., Jordan D. R. Tall 3-dwarfs: oxymoron or opportunity to increase grain yield in sorghum? // *Planta*. 2021. Vol. 253, Article number: 110.

6. Jordan D. R., Tao Y., Godwin I. D., Henzell R. G., Cooper M., McIntyre C. L. Prediction of hybrid performance in grain sorghum using RFLP markers // *Theor Appl Genet*. 2003. Vol. 106, P. 559–567.

7. Olson S.N., Ritter K., Rooney W., Kemanian A., McCarl B.A., Zhang Y. High biomass yield energy sorghum: Developing a genetic model for C4 grass bioenergy crops // *Biofuels, Bioprod Biorefining*. 2012. P. 640–655. DOI: 10.1002/bbb.1357

8. Rivero R.M., Mittler R., Blumwald E., Zandalinas S.I. Developing climate-resilient crops: improving plant tolerance to stress combination // *Plant J*. 2022. Vol. 109, P. 373–389.

9. Takanashi H. Genetic control of morphological traits useful for improving sorghum // *Breeding Science*. 2023. Vol. 73. P. 57–69. DOI: 10.1270/jsbbs.22069

10. Yamaguchi M., Fujimoto H., Hirano K. Sorghum Dw1, an agronomically important gene for lodging resistance, encodes a novel protein involved in cell proliferation // *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6, Article number: 28366.

Поступила: 21.02.25; доработана после рецензирования: 06.03.25; принята к публикации: 11.03.25.

Критерии авторства. Авторы статьи подтверждают, что имеют на статью равные права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторский вклад. Ковтунов В. В. – концептуализация исследований, сбор данных, анализ данных и их интерпретация, подготовка рукописи; Костылев П. И. – анализ данных и их интерпретация; Ковтунова Н. А. – сбор данных, подготовка рукописи; Репешко Ю. В. – выполнение опытов, сбор данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.