

ИЗУЧЕНИЕ АЛЛЕЛЬНОГО РАЗНООБРАЗИЯ ГЕНА RF1 У ОБРАЗЦОВ СОРГО ЗЕРНОВОГО

Н. Н. Вожжова, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории клеточной селекции, nvozhzh@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2046-4000;

О. С. Жогалева, младший научный сотрудник лаборатории клеточной селекции, os.zogaleva@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-1477-3285;

В. В. Ковтунов, доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории селекции и семеноводства сорго, kowtunow85@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-7510-7705

ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской»,
347740, Ростовская обл., г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3; e-mail: vniizk30@mail.ru

Сорго зерновое (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) является одной из важных зерновых культур в мировом производстве. Для создания ценных гетерозисных гибридных линий селекционеры используют цитоплазматическую мужскую стерильность (ЦМС), которая в основном в России основана на цитоплазме типа A1 (milo). Этот тип ЦМС контролируется несколькими генами, одним из которых является ген Rf1. Целью настоящей работы являлось изучение аллельного разнообразия гена Rf1 у селекционных и коллекционных образцов сорго зернового. Геномную ДНК сорго зернового выделяли СТАВ-методом из молодых проростков. Оценка количества и качества ДНК проводили на спектрофотометре. Для ПЦР анализа использовали специфический молекулярный маркер Xtpr18, с помощью которого в результате проведенного исследования было выявлено широкое аллельное разнообразие исследованных 30 образцов сорго зернового. После сопоставления результатов молекулярного анализа и уровня фертильности образцов в полевых условиях было установлено, что наибольшую долю в формировании признака фертильности имеют аллели Rf1j (30 %) и Rf1d (32 %) в группе образцов-восстановителей фертильности (В) и аллели Rf1a (23,33 %), Rf1d (23,33 %) и Rf1c (15 %) – в группе с фертильными растениями, не вовлеченными в скрещивания. Аллели Rf1a, Rf1d и Rf1c имели высокий процент ассоциации с полевой фертильностью образцов (сходный с влиянием аллеля Rf1j), и, следовательно, могут быть использованы в селекционном процессе сорго зернового, направленном на создание линий-восстановителей фертильности. Для селекции сорго зернового в направлении создания линий-восстановителей фертильности рекомендуется использование образцов с аллелем Rf1j (ассоциированным с фертильностью), у которых он проявлялся в большей степени, а сами образцы относились к группе восстановителей фертильности – уч. 21/22, уч. 22/22, уч. 23/22, уч. 24/22 и уч. 27/22. Для создания стерильных линий могут быть использованы генотипы сорго зернового с аллелем Rf1e (ассоциированным со стерильностью) – уч. 7/22, уч. 8/22, уч. 9/22 и ЗСК 1497/21 – после подтверждения их закрепительной способности в полевых условиях.

Ключевые слова: сорго зерновое, Rf1, фертильность, стерильность, аллельное разнообразие.

Для цитирования: Вожжова Н. Н., Жогалева О. С., Ковтунов В. В. Изучение аллельного разнообразия гена Rf1 у образцов сорго зернового // Зерновое хозяйство России. 2024. Т. 16, № 6. С. 28–33. DOI: 10.31367/2079-8725-2024-95-6-28-33.



STUDY OF ALLELIC DIVERSITY OF THE RF1 GENE IN GRAIN SORGHUM SAMPLES

N. N. Vozhzhova, Candidate of Agricultural Sciences, senior researcher of the laboratory for cell breeding, nvozhzh@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2046-4000;

O. S. Zhogaleva, junior researcher of the laboratory for cell breeding, os.zogaleva@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-1477-3285;

V. V. Kovtunov, Doctor of Agricultural Sciences, leading researcher of the laboratory for grain sorghum breeding and seed production, kowtunow85@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-7510-7705

FSBSI Agricultural Research Center "Donskoy",
347740, Rostov region, Zernograd, Nauchny Gorodok Str., 3; e-mail: vniizk30@mail.ru

Grain sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) is one of the important grain crops in world production. In order to develop valuable heterotic hybrid lines, breeders use cytoplasmic male sterility (CMS), which is mainly based on the A1 (milo) cytoplasm in Russia. This type of CMS is controlled by several genes, one of which is the Rf1 gene. The purpose of the current work was to study the allelic diversity of the Rf1 gene in breeding and collection grain sorghum samples. Genomic DNA of grain sorghum was isolated by the CTAB method from young sprouts. The quantity and quality of DNA were estimated by a spectrophotometer. For PCR analysis, there was used a specific molecular marker Xtpr18, which established a wide allelic diversity of the 30 grain sorghum samples studied. The comparison of the results of molecular analysis and the fertility level of samples in field conditions has shown that the greatest share in the fertility formation belonged to the alleles Rf1j (30 %) and Rf1d (32 %) in the group of fertility restorer samples (B); and the alleles Rf1a (23.33 %), Rf1d (23.33 %) and Rf1c (15 %) in the group of fertile plants not involved in crossing. Alleles Rf1a, Rf1d and Rf1c had a high percentage of association with field fertility of the samples (similar to the effect of the Rf1j allele), and therefore can be used in grain sorghum breeding aimed at developing fertility restorer lines. In order to breed grain sorghum to develop fertility restorer lines, it can be recommended to use samples with the Rf1j allele (associated with fertility), in which it was revealed to a greater extent, and the samples themselves belonged

to the group of fertility restorers 21/22, 22/22, 23/22, 24/22 and 27/22. In order to develop sterile lines, there can be used grain sorghum genotypes with the Rf1e allele (associated with sterility) 7/22, 8/22, 9/22 and ZSK 1497/21 after confirming their fixation ability in field conditions.

Keywords: grain sorghum, Rf1, fertility, sterility, allelic diversity.

Введение. Сорго зерновое (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) – это пятая по распространенности выращивания в мире зерновая культура (Ordonio et al., 2016). Оно является основным продуктом питания в ряде стран Африки, расположенных южнее пустыни Сахара, и в странах Южной Азии (Khoddami et al, 2021). Сорго – одна из немногих культур, способных адаптироваться к ряду абиотических стрессов, таких как засоленность почвы или засушливые условия (Zheng et al., 2024).

В Российской Федерации сорго используется в основном в качестве корма для сельскохозяйственных животных. Оно может также применяться в пищевой промышленности в качестве сырья для производства крахмала, для производства биотоплива и спирта, а также для производства продуктов диетического питания (Сыркина и Никонорова, 2020). Выращивается преимущественно на почвах, малопригодных для других культур, на территории от Центрально-Черноземного до Западно-Сибирского региона, в том числе и на юге страны (Кибальник и др., 2021).

Поскольку сорго является перекрестноопыляющейся культурой, для создания ценных гетерозисных гибридных линий селекционеры используют цитоплазматическую мужскую стерильность (ЦМС) в качестве ведущей стратегии (Радченко и др., 2021).

Цитоплазматическая мужская стерильность контролируется взаимодействием генетических факторов цитоплазмы и генов ядра. Стерильная цитоплазма (ЦИТ^S) проявляет свое действие только в случае гомозиготности растения по рецессивному аллелю гена-восстановителя фертильности Rf (генотип ЦИТ^Srfrf). У генотипов ЦИТ^SRfRf и ЦИТ^SRfrf доминантный ген Rf препятствует проявлению действия стерильной цитоплазмы. Если цитоплазма не является стерильной (ЦИТ^N), то при любом аллельном состоянии гена Rf растения нормально фертильны (генотипы ЦИТ^NRfRf, ЦИТ^NRfrf, ЦИТ^Nrfrf) (Косолапов и др., 2013).

У растений с ЦМС имеются недоразвитые пыльники с бесплодной пыльцой, которая лишена запасных питательных веществ, в первую очередь крахмала, отсутствие которого является показателем ее стерильности. ЦМС передается потомству только по материнской линии. При скрещивании стерильных линий (с недоразвитыми слабо окрашенными пыльниками) с различными нормально цветущими сортами и линиями сорго получают гибриды первого поколения, которые могут иметь стерильную, фертильную или полустерильную пыльцу. По реакции на ЦМС исходные сорта и линии-опылители подразделяют на закрепители стерильности, восстановители фертильности и обладающие промежуточной реакцией. К за-

крепителям стерильности относят те образцы, которые при скрещивании со стерильными линиями дают бесплодное потомство. К восстановителям фертильности относят сорта и образцы, которые при скрещивании со стерильными линиями дают нормальное потомство с жизнеспособной пыльцой. Такие линии и сорта впоследствии используют в качестве отцовских форм при создании гибридов сорго зернового (Алабушев и др., 2003).

Наиболее широко используемой селекционерами формой ЦМС сорго зернового в России является ЦМС А1 (milo). В контроле признака восстановления фертильности пыльцы у форм с такой ЦМС принимают участие не менее двух доминантных комплементарных генов – Rf1 и Rf2, а также ген Rf5. Используя разработанные для этих генов молекулярные маркеры для оценки селекционного материала, можно ускорить процесс отбора и создания материнских стерильных линий (А), линий-закрепителей стерильности (В) и восстановителей фертильности пыльцы (R), необходимых для получения гетерозисных гибридов сорго зернового (Радченко и др., 2021).

Локус восстановления фертильности сорго Rf1 расположен на длинном плече хромосомы 8. Для его определения было разработано несколько диагностических маркеров, один из которых, Hxhp18, фланкирует Rf1 на расстоянии 1,18 сМ.

В исследованиях Gao J. (Gao et al., 2013) с использованием четырех тестирующих популяций с известным генотипом родителей (стерильная линия АТх-622, материнская форма ВТх-622 и линии-восстановители фертильности сорго сахарного ВJ-299 и Lunen-2) был получен широкий полиморфизм аллелей гена Rf1 (a = 266 пар нуклеотидов (п. н.), b = 262 п. н., c = 258 п. н., d = 248 п. н., e = 238 п. н., f = 236 п. н., g = 232 п. н., h = 230 п. н., i = 228 п. н., j = 220 п. н.) и выявлены аллели, ассоциированные с проявлением стерильности rf1 (аллель e = 238 п. н.) и восстановления фертильности Rf1 (аллель j = 220 п. н.).

На основании этой информации нами в 2019–2020 гг. был проведен скрининг селекционного материала сорго зернового и выявлено большое разнообразие аллелей по гену Rf1, однако детального аллельного анализа не проводилось (Vozhzhova et al., 2021). Ген Rf1 является доминантным и оказывает большее воздействие на проявление признака фертильности растений сорго зернового по сравнению с генами Rf2 и Rf5, а также показывает широкое аллельное разнообразие, что представляет интерес для селекционной практики.

Таким образом, целью данной работы была оценка разнообразия по аллелям гена контро-

ля фертильности Rf1 у селекционных и коллекционных образцов сорго зернового.

Материалы и методы исследований.

В 2023 г. авторы изучили 30 образцов сорго зернового. Селекционные линии для исследования были предоставлены лабораторией селекции и семеноводства сорго зернового ФГБНУ «АНЦ «Донской».

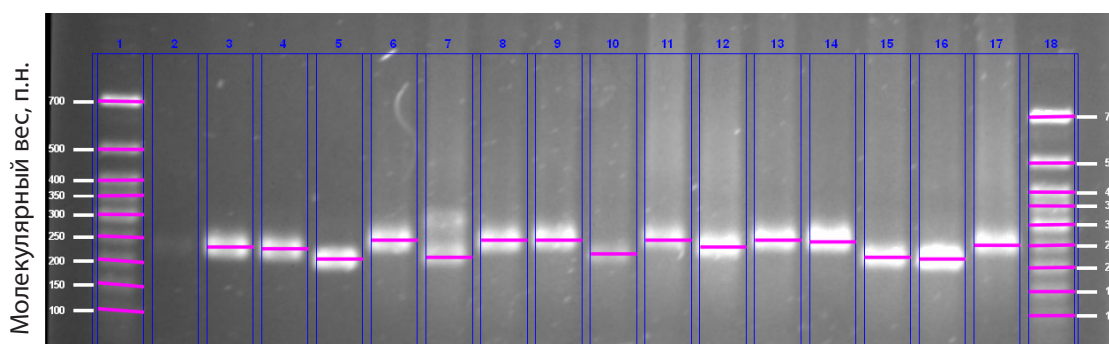
Геномную ДНК экстрагировали из средней пробы молодых проростков СТАВ-методом с модификациями в двукратной повторности (Yadav et al., 2021). Оценку количества и качества ДНК выполняли на спектрофотометре Allsheng Nano-500 (Китай). Для идентификации аллелей гена контроля фертильности Rf1 использовали молекулярный маркер Htxp18 (Klein et al., 2005). При постановке ПЦР-реакции использовали две технические повторности для каждой из двух биологических, тем самым получив 4 повторности для каждого исследуемого генотипа. Электрофорез ампликонов проводили в 2 %-м агарозном геле. Окрашивание геля выполняли 0,1 %-м бромидом этидия. Детекцию ампликонов производили в приборе

Bio-Rad GelDoc XR+ и оценивали их размер с помощью программного обеспечения Bio-Rad ImageLab 5.1.

При проведении полевой оценки фертильности растений сорго зернового образцы разделили на две группы – В и N. Образцы из группы В использовали в скрещиваниях, выполняли оценку фертильности как самих образцов, так и гибридов, полученных с их участием. Образцы из группы N в скрещиваниях не использовали из-за высокой трудоемкости процесса, оценивали только их собственную фертильность.

Результаты и их обсуждение. Так как сорго зерновое является перекрестноопыляющейся культурой, а для выделения ДНК была использована средняя проба из проростков нескольких семян, нами было получено 4 повторности (пробирки) для каждого из исследуемых генотипов.

На рисунке размер выявленных ампликонов контрольных образцов составляет 220 п. н. для сортов Деметра Ф и Волжское 44, около 210 п. н. – для сорта Камышинское 64 (аллель k).



Скрининг образцов сорго зернового на наличие гена контроля фертильности Rf1 на примере одной из повторностей: 1, 18 – маркер молекулярного веса Евроген 50+ bp; 2 – H₂O деионизированная (отрицательный контроль опыта); 3 – Деметра Ф (контроль фертильности); 4 – Волжское 44; 5 – Камышинское 64; 6 – Зерноградское 88 (№ 4); 7 – ЗСК 523/21; 8 – ЗСК 543/21; 9 – ЗСК 496/22; 10 – ЗСК 34 УЧ. 6/15; 11 – ЗСК 1483/21; 12 – ЗСК 1497/21; 13 – ЗСК 465/21; 14 – ЗСК 1546/21; 15 – ЗСК 1548/21; 16 – УЧ. 6/14; 17 – ЗСК 265/18

Screening of grain sorghum samples for the presence of the fertility control gene Rf1 using one of the replicates: 1, 18 – molecular weight marker 'Eurogen 50+ bp';

2 – deionized H₂O (negative control of the trial); 3 – 'Demetra F' (fertility control); 4 – 'Volzhskoe 44'; 5 – 'Kamyshinskoe 64'; 6 – 'Zernogradskoe 88' (No. 4); 7 – ZSK 523/21; 8 – ZSK 543/21; 9 – ZSK 496/22; 10 – ZSK 34 of 6/15; 11 – ZSK 1483/21; 12 – ZSK 1497/21; 13 – ZSK 465/21; 14 – ZSK 1546/21; 15 – ZSK 1548/21; 16 – 6/14; 17 – ZSK 265/18

Аллель d размером 248 п. н. идентифицирован у сорта Зерноградское 88 (№ 4) и образцов ЗСК 543/21, ЗСК 496/22, ЗСК 1483/21, ЗСК 465/21, ЗСК 1546/21, ЗСК 265/18.

Аллель j размером 220 пар нуклеотидов, ассоциированный с фертильностью, выявлен у образцов ЗСК 34 УЧ. 6/15, ЗСК 1548/21, УЧ. 6/14

Аллель e размером 238 п. н., ассоциированный со стерильностью, идентифицирован у образца ЗСК 1497/21.

У образца ЗСК 523/21 выявлен аллель размером 210 п. н., аналогичный таковому у сорта Камышинское 64.

В результате проведенного скрининга всех четырех повторностей у изучаемых образцов

было выявлено широкое разнообразие аллелей гена контроля фертильности Rf1, что свидетельствует о гетерогенности исходного материала. Это согласуется с ранее выполненным нами скринингом исходного материала сорго зернового (Vozhzhova et al., 2021). Ряд идентифицированных нами аллелей мог быть связан с проявлением фертильности образцов аналогично ранее ассоциированному с фертильностью аллелю Rf1j.

После проведения полевой оценки фертильности образцов сорго зернового было выполнено сопоставление наблюдаемых аллелей и фенотипа (табл. 1).

Таблица 1. Сопоставление фенотипических данных и аллельного разнообразия гена Rf1 у образцов сорго зернового*
Table 1. Comparison of phenotypic data and allelic diversity of the Rf1 gene in grain sorghum samples*

№ п/п	Наименование образца	Фенотип	Аллели гена Rf1			
			I	II	III	IV
1	уч. 7/22	N	c+j	e+j	null	null
2	уч. 8/22	N	i	e	null	null
3	уч. 9/22	N	e	null	null	i
4	уч. 15/22	N	b	b	d	d
5	уч. 16/22	B	c	c	g	g
6	уч. 17/22	B	a	a	d	d
7	уч. 18/22	B	a	c	null	null
8	уч. 19/22	B	null	null	d	d
9	уч. 20/22	B	k	j	k	k
10	уч. 21/22	B	null	j	j	j
11	уч. 22/22	B	j	j	j	k
12	уч. 23/22	B	null	null	j	j
13	уч. 24/22	B	j	g	null	j
14	уч. 25/22	B	d	d	d	d
15	уч. 26/22	B	d	d	d	d
16	уч. 27/22	B	j	j	k	j
17	уч. 28/22	B	b	a	d	d
18	уч. 29/22	B	a	a	d	d
19	ЗСК 265/18	N	d	d	null	null
20	Зерноградское 88 (№ 4)	N	a	d	null	null
21	ЗСК 523/21	N	c	k	null	null
22	ЗСК 543/21	N	a	d	null	null
23	ЗСК 496/22	N	a	d	null	null
24	ЗСК 34 Уч. 6/15	B	a	j	null	null
25	ЗСК 1483/21	N	a	c	null	null
26	ЗСК 1497/21	N	a	e	null	null
27	ЗСК 465/21	N	a	c	null	null
28	ЗСК 1546/21	N	a	c	null	null
29	ЗСК 1548/21	N	d	j	null	null
30	Уч. 6/14	N	j	j	null	null

Примечание. * N – фертильный образец; B – восстановитель фертильности; null – амплификация не происходила.

Для обеих групп образцов был выполнен расчет частоты встречаемости аллелей гена Rf1 по всем четырем повторностям (табл. 2 и 3).

Наибольшими долями в образцах сорго зернового, являющихся восстановителями

фертильности, обладали аллели Rf1j (ассоциированный с фертильностью) и Rf1d – 30 и 32 % соответственно. Наименьшее фенотипическое влияние оказывал аллель Rf1b – 2 %.

Таблица 2. Частота встречаемости аллелей гена Rf1 у образцов сорго зернового группы B
Table 2. Occurrence frequency of the Rf1 gene alleles in grain sorghum samples of group B

№ п/п	Аллель Rf1	Частота встречаемости, ед.	Доля в фенотипе, %
1	a	0,14	14,00
2	b	0,02	2,00
3	c	0,06	6,00
4	d	0,32	32,00
5	g	0,06	6,00
6	j	0,30	30,00
7	k	0,10	10,00

Таблица 3. Частота встречаемости аллелей гена Rf1 у образцов сорго зернового группы N
Table 3. Occurrence frequency of the Rf1 gene alleles in grain sorghum samples of group N

№ п/п	Аллель Rf1	Частота встречаемости, ед.	Доля в фенотипе, %
1	a	0,2333	23,33
2	b	0,0333	3,33
3	c	0,1500	15,00
4	d	0,2333	23,33
5	e	0,1167	11,67
6	i	0,0667	6,67
7	j	0,1333	13,33
8	k	0,0333	3,33

Наибольшим влиянием на фенотипическое проявление фертильности обладали аллели Rf1a и Rf1d – по 23,33 %. Вторым по значимости являлся аллель Rf1c – 15 % доли в фенотипе. Наименьшее влияние оказывали аллели Rf1b и Rf1k – по 3,33 %.

Аллель Rf1e (ассоциированный со стерильностью) выявлялся в 11,67 % случаев, но его воздействие в полевых условиях подавлялось аллелями Rf1a, Rf1i и Rf1j.

Таким образом, в нашем исследовании аллели Rf1a, Rf1d и Rf1c имели высокий процент ассоциации с полевой фертильностью образцов (сходный с влиянием аллеля Rf1j) и поэтому они могут быть использованы в селекционном процессе сорго зернового, направленном на создание линий-восстановителей фертильности.

Аллель Rf1i, способный в полевых условиях подавлять влияние аллеля Rf1e (ассоциированного со стерильностью), может быть также использован в селекции линий-восстановителей фертильности сорго зернового.

В результате проведенного анализа образцов сорго зернового по фенотипу и аллельному разнообразию гена контроля фертильности Rf1 было идентифицировано 5 образцов с аллелем Rf1j (ассоциированным с фертильностью), у которых он проявлялся в большей степени, а сами образцы относились к группе восстановителей фертильности – уч. 21/22, уч. 22/22, уч. 23/22, уч. 24/22 и уч. 27/22.

В качестве дополнительных источников для селекционного процесса рекомендуется использование образцов сорго зернового из группы восстановителей фертильности и имеющих аллели Rf1a (уч. 17/22, уч. 18/22, уч. 29/22), Rf1d (уч. 17/22, уч. 19/22, уч. 25/22, уч. 26/22, уч. 28/22, уч. 29/22) и Rf1c (уч. 16/22, уч. 18/22).

Для создания стерильных линий необходимы генотипы, имеющие аллель Rf1e (ассоциированный со стерильностью), который вы-

являлся у образцов уч. 7/22, уч. 8/22, уч. 9/22 и ЗСК 1497/21. Эти образцы могут быть в дальнейшем использованы для оценки закрепительной способности, а при ее подтверждении – для селекции стерильных линий сорго зернового.

Выводы.

1. В результате проведения полевой оценки фертильности образцов сорго зернового было выполнено сопоставление наблюдаемых аллелей и фенотипа, что позволило дифференцировать наиболее часто встречающиеся аллели Rf1j (30 %) и Rf1d (32 %) в группе образцов В; и аллели Rf1a (23,33 %), Rf1d (23,33 %) и Rf1c (15 %) – в группе образцов N.

2. Установлено, что аллель Rf1e (ассоциированный со стерильностью) выявлялся в 11,67 % случаев, но его воздействие в полевых условиях подавлялось аллелями Rf1a, Rf1i и Rf1j.

3. Выявлено, что аллели Rf1a, Rf1d и Rf1c имели высокий процент ассоциации с полевой фертильностью образцов (сходный с влиянием аллеля Rf1j), и, следовательно, могут быть использованы в селекционном процессе сорго зернового, направленном на создание линий-восстановителей фертильности.

4. Для селекции сорго зернового в направлении создания линий-восстановителей фертильности рекомендуется использование образцов с аллелем Rf1j (ассоциированным с фертильностью), у которых он проявлялся в большей степени, а сами образцы относились к группе восстановителей фертильности – уч. 21/22, уч. 22/22, уч. 23/22, уч. 24/22 и уч. 27/22.

5. Для создания стерильных линий могут быть использованы генотипы сорго зернового с аллелем Rf1e (ассоциированным со стерильностью) – уч. 7/22, уч. 8/22, уч. 9/22 и ЗСК 1497/21 – после подтверждения их закрепительной способности в полевых условиях.

Библиографический список

1. Кибальник О. П., Ефремова И. Г., Бочкарева Ю. В., Прахов А. В., Семин Д. С. Продуктивность сорговых культур в зависимости от агротехнических приемов возделывания в регионах российской федерации (обзор) // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2021. № 2. С. 155–166. DOI: 10.30766/2072-9081.2021.22.2.155-166
2. Радченко Е. Е., Алпатьева Н. В., Карабицина Ю. И., Рязанова М. К., Кузнецова Е. Б., Романова О. И., Анисимова И. Н. Разработка и валидация CAPS-маркера, ассоциированного с геном Rf2 у сорго (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) // Биотехнология и селекция растений. 2021. № 4(2). С. 38–47. DOI: 10.30901/2658-6266-2021-2-О4
3. Алабушев А. В., Анипенко Л. Н., Гурский Н. Г., Коломиец Н. Я., Костылев П. И., Мангуш П. А., Алабушева О. И. Сорго (селекция, семеноводство, технология, экономика) // Всероссийский НИИ сорго и других зерновых культур. Ростов-н/Д.: ЗАО «Книга», 2003. 368 с.
4. Сыркина Л. Ф., Никонорова Ю. Ю. Сорго зерновое как возможный источник сырья для переработки на крахмал и спирт // Вестник КрасГАУ. 2020. № 10(163). С. 95–100. DOI: 10.36718/1819-4036-2020-10-95-100
5. Косолапов В. М., Трофимов И. А., Трофимова Л. С. Энциклопедический словарь терминов по кормопроизводству // Рос. акад. с.-х. наук, Гос. науч. учреждение Всерос. науч.-исслед. ин-т кормов им. В. Р. Вильямса. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Тип. Россельхозакадемии, 2013. 589 с.
6. Gao J., Xia B., Luo F., Sun S., Pei Z., Gui Z., Yuan Q., Li X. Marker-assisted breeding for Rf1, a nuclear gene controlling A1 CMS in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) // Euphytica. 2013. Vol. 193, Iss. 3. P. 383–390. DOI: 10.1007/s10681-013-0939-6
7. Khoddami A., Messina V., Vadabali Venkata K., Farahnaky A., Blanchard C. L., Roberts T. H. Sorghum in foods: Functionality and potential in innovative products // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2021. Vol. 63(9). P. 1170–1186. DOI: 10.1080/10408398.2021.1960793

8. Klein R. R., Klein P. E., Mullet J. E., Minx P., Rooney W. L., Schertz K. F. Fertility restorer locus Rf1 of sorghum (*Sorghum bicolor* L.) encodes a pentatricopeptide repeat protein not present in the collinear region of rice chromosome 12 // Theoretical and Applied Genetics. Springer Verlag. 2005. Vol. 111, Iss. 6. P. 994–1012. DOI: 10.1007/s00122-005-2011-y
9. Ordonio R., Ito Y., Morinaka Y., Sazuka T., Matsuoka M. Chapter Five – Molecular Breeding of Sorghum bicolor, A Novel Energy Crop // Editor(s): Kwang W. Jeon, International Review of Cell and Molecular Biology, Academic Press. 2016. Vol. 321. P. 221–257. DOI: 10.1016/bs.ircmb.2015.09.001
10. Vozhzhova N. N., Ionova E. V., Popov A. S., Kovtunov V. V. Identification of fertility gene Rf1 in collection samples of *Sorghum bicolor* (L.) Moench in southern Russia // Biology and Life Sciences Forum. 2021. Vol. 4, Iss. 1. Article number: 81. DOI: 10.3390/IECPS2020-08710
11. Yadav A., Sharma A., Kumar A., Yadav R., Kumar R. SSR based molecular profiling of elite cultivars of basmati rice (*Oryza sativa* L.) // Research Journal of Biotechnology. 2021. Vol. 16(12). P. 55–63. DOI: 10.25303/1612rjbt5563
12. Zheng H., Dang Y., Diao X., Sui N. Molecular mechanisms of stress resistance in sorghum: Implications for crop improvement strategies // Journal of Integrative Agriculture. 2024. Vol. 23, Iss. 3. P. 741–768. DOI: 10.1016/j.jia.2023.12.023

References

1. Kibal'nik O. P., Efremova I. G., Bochkareva Yu. V., Prakhov A. V., Semin D. S. Produktivnost' sorgovykh kul'tur v zavisimosti ot agrotekhnicheskikh priemov vozdeleyvaniya v regionakh rossiiskoi federatsii (obzor) [Productivity of sorghum crops depending on agrotechnical cultivation methods in the regions of the Russian Federation (review)] // Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka. 2021. № 2. S. 155–166. DOI: 10.30766/2072-9081.2021.22.2.155-166
2. Radchenko E. E., Alpat'eva N. V., Karabitsina Yu. I., Ryazanova M. K., Kuznetsova E. B., Romanova O. I., Anisimova I. N. Razrabotka i validatsiya CAPS-markera, assotsiirovannogo s genom Rf2 u sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) [Development and validation of a CAPS marker associated with the Rf2 gene in sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench)] // Biotekhnologiya i selektsiya rastenii. 2021. № 4(2). S. 38–47. DOI: 10.30901/2658-6266-2021-2-04
3. Alabushev A. V., Anipenko L. N., Gurskii N. G., Kolomiets N. Ya., Kostylev P. I., Mangush P. A., Alabusheva O. I. Sorgo (selektsiya, semenovodstvo, tekhnologiya, ekonomika) [*Sorghum* (breeding, seed production, technology, economy)] // Vserossiiskii NII sorgo i drugikh zernovykh kul'tur. Rostov-n/D.: ZAO «Kniga», 2003. 368 s.
4. Syrkina L. F., Nikonorova Yu. Yu. Sorgo zernovoe kak vozmozhnyi istochnik syr'ya dlya pererabotki na krakhmal i spirt [Grain sorghum as a possible source of raw material for processing into starch and spirits] // Vestnik KrasGAU. 2020. № 10(163). S. 95–100. DOI: 10.36718/1819-4036-2020-10-95-100
5. Kosolapov V. M., Trofimov I. A., Trofimova L. S. Entsiklopedicheskii slovar' terminov po kormoproizvodstvu [Encyclopedic dictionary of forage production terms] // Ros. akad. s.-kh. nauk, Gos. nauch. uchrezhdenie Vseros. nauch.-issled. in-t kormov im. V. R. Vil'yamsa. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Tip. Rossel'khozakademii, 2013. 589 s.
6. Gao J., Xia B., Luo F., Sun S., Pei Z., Gui Z., Yuan Q., Li X. Marker-assisted breeding for Rf1, a nuclear gene controlling A1 CMS in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) // Euphytica. 2013. Vol. 193, Iss. 3. P. 383–390. DOI: 10.1007/s10681-013-0939-6
7. Khoddami A., Messina V., Vadabali Venkata K., Farahnaky A., Blanchard C. L., Roberts T. H. Sorghum in foods: Functionality and potential in innovative products // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2021. Vol. 63(9). P. 1170–1186. DOI: 10.1080/10408398.2021.1960793
8. Klein R. R., Klein P. E., Mullet J. E., Minx P., Rooney W. L., Schertz K. F. Fertility restorer locus Rf1 of sorghum (*Sorghum bicolor* L.) encodes a pentatricopeptide repeat protein not present in the collinear region of rice chromosome 12 // Theoretical and Applied Genetics. Springer Verlag. 2005. Vol. 111, Iss. 6. P. 994–1012. DOI: 10.1007/s00122-005-2011-y
9. Ordonio R., Ito Y., Morinaka Y., Sazuka T., Matsuoka M. Chapter Five – Molecular Breeding of Sorghum bicolor, A Novel Energy Crop // Editor(s): Kwang W. Jeon, International Review of Cell and Molecular Biology, Academic Press. 2016. Vol. 321, P. 221–257. DOI: 10.1016/bs.ircmb.2015.09.001
10. Vozhzhova N. N., Ionova E. V., Popov A. S., Kovtunov V. V. Identification of fertility gene Rf1 in collection samples of *Sorghum bicolor* (L.) Moench in southern Russia // Biology and Life Sciences Forum. 2021. Vol. 4, Iss. 1. Article number: 81. DOI: 10.3390/IECPS2020-08710
11. Yadav A., Sharma A., Kumar A., Yadav R., Kumar R. SSR based molecular profiling of elite cultivars of basmati rice (*Oryza sativa* L.) // Research Journal of Biotechnology. 2021. Vol. 16(12), P. 55–63. DOI: 10.25303/1612rjbt5563
12. Zheng H., Dang Y., Diao X., Sui N. Molecular mechanisms of stress resistance in sorghum: Implications for crop improvement strategies // Journal of Integrative Agriculture. 2024. Vol. 23, Iss. 3. P. 741–768. DOI: 10.1016/j.jia.2023.12.023

Поступила: 29.10.24; доработана после рецензирования: 21.11.24; принята к публикации: 21.11.24.

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. Вожжова Н. Н. – концептуализация исследований, анализ данных и их интерпретация, сбор литературных данных и подготовка рукописи; Жогалева О. С. – проведение лабораторных исследований и их анализ, Ковтунов В. В. – сбор и предоставление образцов для анализа, оценка полевой фертильности образцов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.