Сельскохозяйственный журнал. 2023. № 1 (16). С. 25-33
Agricultural journal. 2023; 16 (1). P. 25-33

Агрономия, лесное и водное хозяйство

Научная статья
УДК 633.174:58.032.3[631.527/56+575.133]
DOI 10.48612/FARC/2687-1254/003.1.16.2023

КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ КОМПОНЕНТОВ СКРЕЩИВАНИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НОВЫХ ЗАСУХОУСТОЙЧИВЫХ ГИБРИДОВ ЗЕРНОВОГО СОРГО

Оксана Павловна Кибальник, Татьяна Витальевна Ларина
Федеральное государственное научное бюджетное учреждение «Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы»,
Россия, г. Саратов. E-mail: rossorgo@yandex.ru

Аннотация. Для создания стрессоустойчивых гибридов сорго одним из важных этапов является подбор засухоустойчивых компонентов скрещиваний с необходимым комплексом хозяйственно-ценных признаков. Для этого селекционеру приходится рассматривать огромный объем показателей изучаемых признаков у большого количества генотипов. Цель исследований – выделить родительские формы (ЦМС-линии и опылители), характеризующиеся комплексом физиологических и селекционных признаков для включения в селекционный процесс по созданию засухоустойчивых гибридов F1 зернового сорго. В данной работе применяли один из методов многомерного статистического анализа – кластеризацию исходного материала (всего 28 образцов), позволяющей группировать родительские компоненты по 15 признакам. Материнские и отцовские формы выращивали в 2022 году на опытном поле ФГБНУ РосНИИСК «Россорго». В результате выделено восемь кластеров: первый включает 5 ЦМС-линий (А2 КВВ 181, А2 Карлик 4в, А3 Карлик 4в, А5 Карлик 4в, А6 Карлик 4в); второй – 7 опылителей и 4 ЦМС-линии; третий – стерильную линию А2 Восторг; четвертый – 4 ЦМС-линии (А3 Желтозерное 10, А4 Желтозерное 10, 9Е Желтозерное 10, А3 Фетерита 14); пятый – стерильную линию А2 Судзерн; шестой – 2 сорта (РСК Кахолонг, РСК Коралл); седьмой – 2 сорта (РСК Инфинити, Принц) и стерильную линию А1 Ефремовское 2; восьмой – стерильную линию А2 КВВ 114. Для дальнейшей селекционной работы по выведению новых засухоустойчивых и продуктивных гибридов первого поколения следует использовать 17 генотипов родительских форм, обладающих совокупностью требуемых физиологических, морфологических признаков и урожайностью. Данные компоненты скрещиваний входят во второй, шестой,седьмой и восьмой кластеры.

Ключевые слова: зерновое сорго, засухоустойчивость, параметры водного режима листьев, урожайность, морфометрические признаки.

Для цитирования: Кибальник О. П., Ларина Т. В. Кластерный анализ компонентов скрещиваний для создания новых засухоустойчивых гибридов зернового сорго // Сельскохозяйственный журнал. 2023. № 1 (16). С. 25-33.
DOI 10.48612/FARC/2687-1254/003.1.16.2023

Agronomy, forestry and water industry

Original article

CLUSTER ANALYSIS OF CROSSING COMPONENTS FOR THE DEVELOPMENT OF NEW DROUGHT-TOLERANT HYBRIDS OF GRAIN SORGHUM

Oksana P. Kibalnik, Tatiana V. Larina
FSBSI "Russian Research and Design-Technological Institute of Sorghum and Corn", Russia, Saratov. E-mail: kibalnik79@yandex.ru

Abstract. In order to develop stress tolerant sorghum hybrids, one of the important stages is the selection of drought-tolerant components of crosses with the necessary complex of economically valuable traits. For this purpose, the breeder has to consider a huge amount of parameters of the studied traits in a large number of genotypes. The aim of the research is to identify parental forms (CMS lines and pollinators), which are characterized by a complex of physiological and breeding characteristics for inclusion in the breeding process for the development of drought-tolerant F1 hybrids of grain sorghum. In this paper, one of the methods of multivariate statistical analysis was used – clustering of parent material (28 samples in total), which allowed grouping parent components by 15 characteristics. Female and male lines were grown in 2022 on the experimental field of "Rossorgo". As a result, 8 clusters were identified: the first included 5 CMS-lines (A2 KVV 181, A2 Karlik 4v, A3 Karlik 4 v, A5 Karlik 4 v, A6 Karlik 4 v); the second – 7 pollinators and 4 CMS-lines; the third – the sterile line A2 Vostorg; the fourth – 4 CMS-lines (A3 Zheltozyornoe 10, A4 Zheltozyornoe 10, 9E Zheltozyornoe 10, A3 Feterita 14); the fifth – the sterile line A2 Sudzern; the sixth – 2 varieties (RSK Kakholong, RSK Korall); the seventh – 2 varieties (RSK Infinity, Prince) and the sterile line A1 Efremovskoe 2; the eighth was the sterile line A2 KVV 114. For further selective breeding of new drought- tolerant and productive hybrids of the first generation, 17 genotypes of parental forms should be used. They have a set of the required physiological, morphological characteristics and yield. These components of crosses are included in the second, sixth, seventh and eighth clusters.

Key words: grain sorghum, drought tolerance, water relations parameters of leaves, yield, morphometric features

For citation: Kibalnik O. P., Larina T. V. Cluster analysis of crossing components for the development of new drought- tolerant hybrids of grain sorghum // Agricultural journal. 2023; 16 (1). P. 25-33. DOI 10.48612/FARC/2687-1254/003.1.16.2023

Введение. Сорго – засухоустойчивая культура, способная формировать высокий урожай семян и биомассы в стрессовых агроклиматических условиях: отсутствие достаточного количества осадков, повышение среднесуточной температуры воздуха, продолжительность действия засухи, выращивание на маргинальных почвах и другие. Причем, наибольший вред развитию растений наносит засуха: даже среди сорговых культур встречаются генотипы, реагирующие на наступление засухи в некоторые фазы развития растений. Так, для сорго наступление засухи в начальный период вегетации приводит к снижению темпов роста и развития, а во время цветения способствует ча-

стичной или полной потере урожая зерна [1, 2]. Поэтому включение в исходный материал образцов с более адаптивной физиологической реакцией на действие засухи является приоритетным в селекции на повышение засухоустойчивости новых гибридов. Известно, что у гибридов первого поколения достаточно часто проявляется эффект гетерозиса по многим селекционным признакам, в том числе и урожайности [3]. Выявление компонентов скрещиваний, отвечающих требованиям модели родительских форм для нового гибрида – трудоемкий процесс, требующий анализа болького количества признаков. В последнее время селекционеры все чаще применяют методы многометрной статистики: кластеный, факторный, регрессионный, анализ главных компонент и т.д. Использование кластерного анализа в селекции сельскохозяйственных культур значительно ускоряет обработку экспериментальных данных и позволяет сгруппировать и систематизировать генотипы, сходные по комплексу изучаемых праметров [4, 5].

Цель исследований – выделить родительские формы (ЦМС-линии и опылители), характеризующиеся комплексом физиологических и селекционных признаков для включения в селекционный процесс по созданию засухоустойчивых гибридов F1 зернового сорго.

Материал и методы исследований. Оценку показателей водного режима листьев и основных селекционно-ценных признаков проводили в 2022 году. Растения 17 стерильных линий и 11 опылителей (сорта и линии) зернового сорго выращивали на опытном поле ФГБНУ РосНИИСК «Россорго». Площадь делянки материнских форм составила 7,7 $м^2$, отцовских – 30,8 $м^2$. Густота стояния растений (100 тыс./га) скорректирована вручную. Размещение делянок рендомизированное в трехкратной повторности. Оценку морфометрических признаков и анализ урожайности проводили по общепринятой методике [7].

Оценку показателей водного режима листьев осуществляли согласно Диагностике устойчивости растений к стрессовым воздействиям [6]. У каждого генотипа отбирали по пять наибольших листьев в фазу «цветение растений».

Для определения оводненности тканей (ОТ) листья высушивали в термостате при температуре 105 °С до постоянной массы. Количество воды в процентах от сырой массы навески вычесляли по формуле:

$$ОТ = ((а – б) / а) \times 100,$$

где а – масса сырой навески (г); б – масса сухой навески (г).

Потерю воды (ПВ) листьями в процентах определяли через 0,5; 1,0; 1,5 и 24 часа путем взвешивания листьев в лаборатории на электронных весах, после чего проводился расчет показателя по формуле:

$$ПВ = (В / А) \times 100,$$

где А – содержание воды в листьях до начала опыта (г); В – потеря воды за определенный промежуток времени (г).

Для определения водного дефицита (ВД) листья помещали в сосуд с водой и накрывали. После 24-часового насыщения листья промокали фильтровальной бумагой и взвешивали. Использовалась формула:

$$ВД = (M_2 – M_1) \times 100 / (M_2 – M_3),$$

где M_1 – масса листьев до насыщения водой (г); M_2 – масса листьев после 24-часового насыщения (г); M_3 – масса сухой навески (г).

Статистическая обработка экспериментальных результатов исследований выполнена методами кластерного анализа по минимуму евклидового расстояния с помощью программы «Агрос 2.09».

Результаты исследований и их обсуждение. Информативным методом оценки засухоустойчивости растений в полевых условиях служит определение водного баланса, изучение которого связано с физиологическими параметрами: скорость водоотдачи листьями, водный дефицит, оводненность тканей листьев, их водоудерживающая способность [8].

Для выявления генотипов, обладающих совокупностью физиологических и хозяйственно-ценных признаков, с последующим их включением в гибридизацию, провели кластеризацию рабочей коллекции по минимуму эвклидовых расстояний (рисунок 1). Так, на 21 шаге итерации (минимум евклидовых расстояний равен 16,41) выделено 8 кластеров (таблица 1).

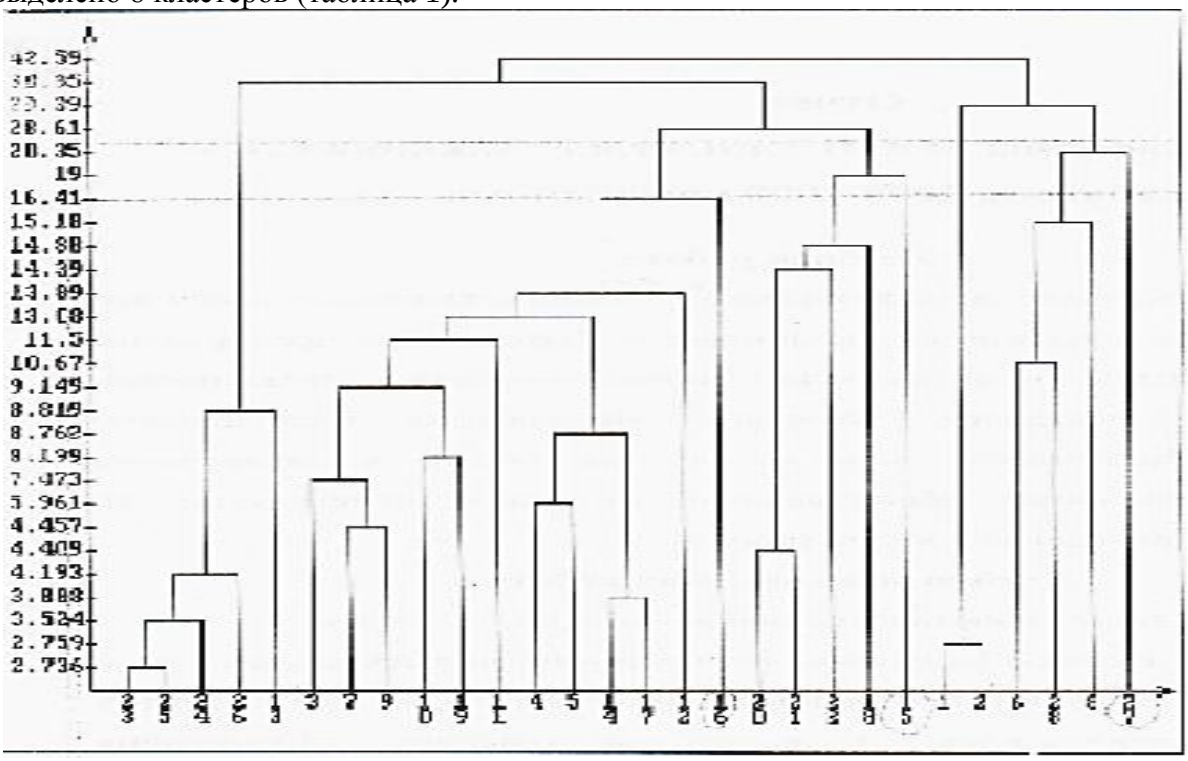

Рисунок 1. Дендрограмма сходства компонентов скрещиваний зернового сорго по комплексу физиологических и селекционных показателей

Примечание: **1** – РСК Кахалонг; **2** – РСК Коралл; **3** – Магистр; **4** – Пищевое 614; **5** – Кремовое; **6** – РСК Инфинити; **7** – Кулон; **8** – Принц; **9** – Л-251/14; **10** – Л-50/14; **11** – Л-65/14; **12** – А2 Тамара; **13** – А2 КВВ 181; **14** – А1 О-Янг 1; **15** – А2 Судзерн светлый; **16** –А2 Восторг; **17** –9Е Пищевое 614; **18** – А3 Фетерита 14; **19** – А4 КП 70; **20** – А3 Желтозерное 10; **21** – А4 Желтозерное 10; **22** – 9Е Желтозерное 10; **23** – А6 Карлик 4в; **24** – А2 Карлик 4в; **25** – А3 Карлик 4в; **26** – А5 Карлик 4в; **27** – А2 ККВ 114; **28** – А1 Ефремовское 2.

Таблица 1

Распределение образцов по кластерам

Количество кластеров	Название образца
1	А6 Карлик 4в, А2 Карлик 4в, А3 Карлик 4в, А5 Карлик 4в, А2 КВВ 181
2	Магистр, Кулон, Л-251/14, Л-50/14, А4 КП70, Л-65/14, Пищевое 614, Кремовое, А1 О-Янг 1, 9Е Пищевое 614, А2 Тамара
3	А2 Восторг
4	А3 Желтозерное 10, А4 Желтозерное 10, 9Е Желтозерное 10, А3 Фетерита 14
5	А2 Судзерн
6	РСК Кахолонг, РСК Коралл
7	РСК Инфинити, А1 Ефремовское 2, Принц
8	А2 КВВ 114

Достоверность различий между группами подтверждается результатами дисперсионного однофакторного анализа по всем физиологическим, морфометрическим признакам, элементам урожайности ($F_{ф.} \geq F_{теор.}$) и представлена в таблице 2.

Таблица 2

Распределение стерильных линий и сортов-опылителей, характеризующихся схожими признаками, по кластерам

Кластер	Оводненность листьев, %	Водный дефицит, %	Водоудерживающая способность, %	Потеря влаги через 30 мин, %	Потеря влаги через 60 мин., %	Потеря влаги через 90 мин., %	Потеря влаги через 24 ч., %
1	75,0	17,8	76,2	10,4	17,3	23,9	64,3
2	74,7	14,6	83,6	6,4	11,6	16,5	67,5
3	75,9	8,7	78,7	8,6	15,3	21,3	66,4
4	70,5	15,5	84,1	6,2	11,5	15,9	64,6
5	70,9	18,4	79,7	7,7	13,9	20,3	61,1
6	75,7	9,8	89,3	4,1	7,7	10,7	71,8
7	71,5	11,4	88,8	4,6	8,5	11,2	64,9
8	70,3	4,3	90,2	3,3	7,2	9,9	63,6
$F_{факт.}$	4,45*	5,79*	16,07*	17,43*	15,05*	16,03*	6,02*
$НСР_{05}$	3,09	4,42	3,54	1,57	2,59	3,54	3,12

Часть 2 таблицы 2

Кластер	Средняя потеря влаги за 1ч/сут., %	Высота при созревании, см	Длина наибольшего листа, см	Площадь наибольшего листа, $см^2$	Длина соцветия, см	Масса 1000 зерен, г	Урожайность семян, т/га	Урожайность биомассы, т/га
1	2,7	83,7	28,2	106,8	21,1	26,5	2,47	11,53
2	2,8	118,9	39,4	146,2	23,4	29,6	4,24	17,67
3	2,8	116,8	40,7	124,5	23,8	31,1	3,10	11,72
4	2,7	99,4	32,2	121,5	14,8	34,3	2,61	10,45
5	2,6	136,7	34,0	90,0	22,8	32,0	2,28	10,51
6	2,9	117,5	51,8	291,6	25,1	24,2	4,81	19,06
7	2,7	140,5	55,7	252,7	24,7	23,3	3,05	15,92
8	2,7	90,6	45,0	151,1	22,0	24,4	2,10	11,87
$F_{факт.}$	5,82*	6,66*	4,34*	14,28*	5,95*	4,83*	6,64*	9,05*
$НСР_{05}$	0,13	22,96	13,56	49,81	4,41	5,17	1,15	3,62

*Примечание: *$p \leq 0,05$.*

В первый кластер входит пять стерильных линий. Особенностями представителей данной группы являются высокая оводненность тканей листьев (75,0 %), высокий водный дефицит (17,8 %) и потери влаги листьями при увядании в первые 1–1,5 ч (10,4–23,9 %). При этом средние потери влаги за 1 ч. в сутки оказались минимальными – 2,7 %. Также ЦМС-линии отличаются низкой урожайностью зерна (2,47 т/га) и биомассы (11,53 т/га), коротким наибольшим листом (28,2 см).

Второй кластер включает многочисленную группу сортов и линий (всего 11), характеризующихся высокой оводненностью тканей (74,7 %) и водоудерживающей способностью (83,6 %) листьев, средними показателями водного дефицита (14,6 %). Вместе с тем образцы данного кластера отличаются средними значениями морфометрических признаков и высокими по урожайности (зерна – 4,24 т/га, биомассы – 17,67 т/га).

Третий кластер представлен одним генотипом линии А2 Восторг. Как и предыдущие образцы из первых двух кластеров, обладает высокой оводненностью листьев (75,9 %) и низким водным дефицитом (8,7 %). При этом потери влаги увеличиваются: за 24 ч. увядания – 66,4 %. Масса 1000 зерен – 31,1 г.

Четвертый кластер состоит из четырех стерильных линий, отличительной особенностью которых является крупное зерно (масса 1000 зерен – 34,3 г) на коротком соцветии (длина – 14,8 см), средние значения физиологических и морфометрических показателей, а также невысокая урожайность в условиях года: зерна – 2,61 т/га, биомассы – 10,45 т/га.

Пятый кластер представлен одной высокорослой стерильной линией А2 Судзерн (136,7 см), преимущество которой заключается в способности удерживать влагу в листьях через сутки естественного увядания (потеря влаги – 61,1 %) и формировать относительно крупное зерно (масса 1000 зерен – 32,0 г).

Шестой кластер состоит из двух наиболее продуктивных сортов (урожайность зерна – 4,81 т/га, биомассы – 19,06 т/га) с высокой оводненностью (75,7 %) и водоудерживающей способностью листьев (89,3 %), низкими потерями влаги в первые 1,5 ч. увядания (4,1–10,7 %), несмотря на большую площадь листа (291,6 $см^2$).

Седьмой кластер представлен высокорослыми (140,5 см) двумя сортами и одной стерильной линией, имеющих сходство по размерам фотосинтезирующей поверхности листьев (длина листа – 55,7 см, площадь – 252,7 $см^2$), способности удерживать ими влагу в условиях стресса: потери в первые часы увядания – 4,6–11,2 %, средним значением водного дефицита (11,4 %) и урожайностью (зерно – 3,05 т/га, биомасса – 15,92 т/га).

Низкорослая ЦМС-линия А2 КВВ 114 (90,6 см) включена в последний кластер. Согласно шкале оценки относительной засухоустойчивости [6] ее следует считать высокозасухоустойчивой по всем изученным физиологическим признакам: оводненности (70,3 %), водному дефициту (4,3 %), водоудерживающей способности (90,2 %), потере влаги в начальный период увядания (от 3,3 % до 9,9 %).

Следует отметить, что проведенные ранее исследования по изучению водного режима листьев ЦМС-линий показали, что стабильно по годам характеризуется высокой засухоустойчивостью по комплексу показателей стерильная линия А2 КВВ 114 [9], а также сорт Магистр и линия Л-65/14, входящие во второй кластер [10].

Заключение. При создании гибридов F1, адаптированных к изменяющимся условиям Нижневолжского региона, одним из важных этапов является поиск генетических источников, используемых в качестве исходного материала. Так, в результате изучения относительной засухоустойчивости рабочей коллекции стерильных линий с разными ЦМС-индуцирующими цитоплазмами и сортообразцов зернового сорго по комплексу показателей, содержащих физиологические, морфометрические признаки и урожайность, выделены перспективные компоненты скрещиваний (17 образцов из 2, 6, 7, 8 кластеров) для включения в селекционную программу с целью создания засухоустойчивых и продуктивных гибридов F1. Следует отметить, что сорта и линии, включенные во второй и седьмой кластеры отличаются средней засухоустойчивостью только по одному показателю водного режима листьев – водный дефицит (11,4–14,6 %). Полученные результаты свидетельствуют о высокой засухоустойчивости селекционного материала ФГБНУ РосНИИСК «Россорго» в критическую для сорго фазу «цветение».

Список источников

1. Physiological mechanisms of drought tolerance in sorghum, genetic basis and breeding methods: A review / B. Amelework, H. Shimelis, P. Tongoona, M. Laing // African Journal of Agricultural Research. 2015. V. 10. P. 3029-3040.
2. Genetic Dissection of Pre-Flowering Growth and development in Sorghum bicolor L. Moench under Well-Watered and Drought Stress Conditions / N. Phuong, G. Afolayan, M.E. Soda et all. // Agricultural Sciences. 2014. V.5. P. 923-934.
3. Володин А.Б., Капустин С.И., Капустин А.С. Схема селекции и уровень гетерозиса гибридов сорго сахарного // Таврический вестник аграрной науки. 2021. № 1(25). С. 64-72.
4. Агроэкологическая оценка и кластерный анализ сортов и селекционных линий тритикале Российской селекции /С.Н. Пономарев, М.Л. Пономарева, Л.Ф. Гильмуллина и др. // Достижения науки и техники АПК. 2016. Т. 30. № 6. С. 41–44.

5. Перевязка Д.С., Перевязка Н.И., Супрунов А.И. Кластерный анализ нового исходного материала для создания раннеспелых и среднеранних гибридов кукурузы // Рисоводство. 2021. № 4 (53). С. 30–35.
6. Удовенко Г.В. Диагностика устойчивости растений к стрессовым воздействиям: методическое руководство – Л.: ВИР, 1988. С. 49-50.
7. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. – М.: Агропромиздат, 1989. 194 с.
8. Жанг Д.Ч., Тохтарь В.Х. Исследование засухоустойчивости перспективных для интродукции видов *Momordica charantial* и *M. Balsaminal* (Cucurbitaceae) // Научные ведомости. Серия естественные науки. 2011. № 9 (104). Вып. 15. С. 43-47.
9. Оценка засухоустойчивости ЦМС-линий сорго на основе различных источников стерильности / О.П. Кибальник, Т.В. Ларина, О.Б. Каменева, Д.С. Семин //Труды по ботанике, генетике и селекции. 2021. № 182 (4). С. 9-17.
10. Kibalnik O.P. Influence of Abiotic Stresses on Morphophysiological Characteristics and Biological Value of Grain Sorghum bicolor (L.) Moench / O.P. Kibalnik, I.A. Sazonova, Y.V. Bochkareva, V.V. Bychkova, D.S. Semin // Internation Journal of Plant Biology. 2023. V. P. 150–161.

References

1. Physiological mechanisms of drought tolerance in sorghum, genetic basis and breeding methods: A review / B. Amelework, H. Shimelis, P. Tongoona, M. Laing // African Journal of Agricultural Research.2015. V. 10. P. 3029-3040.
2. Genetic Dissection of Pre-Flowering Growth and development in Sorghum bicolor L. Moench under Well-Watered and Drought Stress Conditions / N. Phuong, G. Afolayan, M.E. Soda et all. // Agricultural Sciences. 2014.V.5. P. 923-934.
3. A.B. Volodin, S.I. Kapustin, A.S. Kapustin Breeding scheme and heterosis level of sweet sorghum hybrids // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2021. No. 1(25). pp. 64-72.
4. Agroecological assessment and cluster analysis of varieties and breeding lines of triticale of Russian selective breeding / S.N. Ponomarev, M.L. Ponomareva, L.F. Gilmullina et all. //Achievements of Science and Technology of AIC. 2016. Vol. 30. No 6. pp.41-44.
5. Perevyazka D.S., Perevyazka N.I., Suprunov A.I. Cluster analysis of a new initial material for the creation of early and middle-early corn hybrids // Rice growing. 2021. No 4 (53). pp.30-35.
6. Udovenko, G.V. Diagnostics of plant stress tolerance.–L.: VIR, 1988. pp. 49-50.
7. Methodology of state variety testing of agricultural crops. – M: Agropromizdat, 1989. p. 194.
8. Zhang D.Ch., Tokhtar V.Kh. Drought tolerance study of promising species *Momordicacharantial* and *M. Balsaminal* (Cucurbitaceae) for introduction // Belgorod State University Scientific bulletin Natural sciences. 2011. No 9 (104). iss. 15. pp. 43-47.
9. Assessment of drought tolerance in sorghum of CMS lines based on various sterility sources / O.P. Kibalnik, T.V. Larina,O.B. Kameneva, D.S. Semin // Proceedings on applied botany, genetics and breeding. 2021. No 182 (4). pp. 9-17.

10. Kibalnik O.P. Influence of Abiotic Stresses on Morphophysiological Characteristics and Biological Value of Grain Sorghum bicolor (L.) Moench / O.P. Kibalnik, I.A. Sazonova, Y.V. Bochkareva, V.V. Bychkova, D.S. Semin // Internation Journal of Plant Biology. 2023. V. 14. P. 150–161.

Информация об авторах

О.П. Кибальник – кандидат биологических наук, главный научный сотрудник отдела сорговых культур ФГБНУ РосНИИСК «Россорго». E-mail: kibalnik79@yandex.ru
Т.В. Ларина – научный сотрудник отдела биохимии и биотехнологии ФГБНУ РосНИИСК «Россорго». E-mail: larinatv@gmail.com

Information about the authors

O.P. Kibalnik – Candidate of Biological Sciences, Chief researcher, Department of sorghum crops, FSBSI Russian Research and Design-Technological Institute of Sorghum and Corn. E-mail: kibalnik79@yandex.ru
T.V. Larina – Scientific Researcher, Department of biochemistry and biotechnology, FSBSI Russian Research and Design-Technological Institute of Sorghum and Corn. E-mail: larinatv@gmail.com

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors' contribution: All authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 27.01.2023; одобрена после рецензирования 15.02.2023; принята к публикации 17.03.2023.

The article was submitted 27.01.2023; approved after reviewing 15.02.2023; accepted for publication 17.03.2023.

© Кибальник О. П., Ларина Т. В., 2023