

Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 3. С. 183-191.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2024. Vol. 107, no 3. P. 183-191.

Научная статья
УДК 633.173:631.52
doi:10.33284/2658-3135-107-3-183

ОБЩЕЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ И РАСТЕНИЕВОДСТВО

**Об эффективности оценки селекционного материала проса посевного на основе
рекомбинационной способности**

Рамиль Дамирович Камалеев¹, Антонина Александровна Новикова²

¹²Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия

¹kamaleevramil79@yandex.ru

²tony-novikova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6947-9262>

Аннотация. Эффективность селекционного процесса обеспечивается комплексом приёмов оценки исходного материала. Рекомбинационный потенциал родительских форм – важный признак, который необходимо учитывать при вовлечении сортообразцов в гибридизацию. Объектом исследования стали 36 сортов проса посевного. Рекомбинационную способность рассчитывали по каждому сорту как отношение количества созданных комбинаций к количеству сортообразцов, дошедших до конкурсного сортоиспытания. В результате анализа выделены сорта, которые лучше включать в гибридизацию в качестве материнской линии, т. к. коэффициент рекомбинационного потенциала (КРП) у них выше в прямых скрещиваниях, и сорта, обладающие высоким КРП в обратных скрещиваниях, включение которых в селекционный процесс целесообразно только в качестве отцовской линии.

Ключевые слова: просо посевное, селекция, исходные формы, рекомбинационная способность, родительский сорт, гибридизация

Благодарности: работа выполнена в соответствии с планом НИР на 2022-2026 гг. ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (FNWZ-2022-0015).

Для цитирования: Камалеев Р.Д., Новикова А.А. Об эффективности оценки селекционного материала проса посевного на основе рекомбинационной способности // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 3. С. 183-191. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-3-183>

GEOPONICS AND CROP PRODUCTION

Original article

On the efficiency of evaluation of seed millet breeding material based on recombination ability

Ramil D Kamaleev¹, Antonina A Novikova²

¹²Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

¹kamaleevramil79@yandex.ru

²tony-novikova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6947-9262>

Abstract. The effectiveness of the breeding process is ensured by a set of techniques for evaluating the source material. The recombination potential of the parent forms is an important feature that must be taken into account when involving cultivars in hybridization. The object of the study was 36 varieties of millet. The recombination ability was calculated for each variety as the ratio of the number of combina-

tions created to the number of varieties that reached the competitive variety testing. As a result of the analysis, varieties were identified that are better included in hybridization as a maternal line, since their recombination potential coefficient (RPC) is higher in direct crosses, and varieties with high RPC in reverse crosses, the inclusion of which in the breeding process is advisable only in paternal line.

Keywords: seed millet, breeding, initial forms, recombination ability, parent variety, hybridization

Acknowledgments: the work was carried out in accordance with the research plan for 2022-2026 of the FSBRI FRC BST RAS (FNWZ-2022-0015).

For citation: Kamaleev RD, Novikova AA. On the efficiency of evaluation of seed millet breeding material based on recombination ability. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(3):183-191. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-3-183>

Введение.

Одним из механизмов реализации «Доктрины продовольственной безопасности России» является увеличение объёма производства зерновой продукции. Модернизация сельскохозяйственных машин и оборудования, разработка и применение средств защиты растений, внедрение новых агротехнологических приёмов, внедрение биотехнологических и молекулярно-генетических методов в селекционный процесс в итоге направлены на увеличение выхода зерна с единицы площади. Эффективность перечисленных мер обеспечивается правильным выбором сортов сельскохозяйственных культур для каждой климатической зоны.

В свою очередь, селекция – главный путь решения задач лучшей адаптации растений к природно-климатическим условиям районов выращивания. Внедрение нового сорта в земледелии было и остаётся пока одним из основных средств повышения продуктивности и улучшения качественных характеристик продукции, не требующих дополнительных затрат при возделывании его в производстве (Антимонов А.К. и др., 2018).

Основой селекционного процесса являются базовые формы, максимально приспособленные к условиям произрастания и обладающие комплексом хозяйственно-ценных признаков. Чем разнообразнее генетический материал, тем успешней идёт селекционная работа. Возможности сорта в реализации потенциала урожайности, устойчивости к стрессовым факторам, его технология возделывания зависят от условий выращивания (Сокурова Л.Х., 2022; Новикова А.А. и др., 2023; Регер Н.С. и др., 2022).

В связи с этим многие селекционные учреждения (Поволжский НИИ селекции и семеноводства им. П.Н. Константинова, Кабардино-Балкарский НИИСХ, Воронежский НИИСХ им. В.В. Докучаева и др.) занимаются изучением образцов мировых коллекций сельскохозяйственных культур, в том числе проса, с целью выделения источников с необходимыми признаками (Сокурова Л.Х., 2019; Тихонов Н.П. и др., 2018).

За многолетний период селекционной работы в каждом научном учреждении накоплен большой объём информации, позволяющий оценивать генотипы не только по урожайности, но и по адаптивному потенциалу, экологической пластичности и стабильности, комбинационной способности (Сурков А.Ю., 2014).

Изначально метод оценки комбинационной способности применяли при работе с перекрёстноопыляемыми культурами. Известность он получил при работе с кукурузой. Сегодня этот метод широко используют в селекции самоопылителей. О преимущественном использовании оценки рекомбинации базового селекционного материала отмечено и в работах Н.И. Тишкова (2011). Он пишет, что успех селекционной работы во многом зависит от рекомбинационной способности конкретного сорта. Исследования автора показывают, что основой каждой перспективной линии является сорт с высокой рекомбинационной способностью (Тишков Н.И., 2011).

Цель исследований.

Оценка родительских линий проса посевного по рекомбинационной способности и выявление ценных форм для создания гибридного материала.

Материалы и методы исследования.

Объект исследований. Сорта проса посевного оренбургской селекции и образцы из мировой коллекции Всероссийского научно-исследовательского института растениеводства им. Н.И. Вавилова.

Схема эксперимента. Коэффициент рекомбинационного потенциала считали по методике, предложенной Н.И. Тишковым (2011), которая базируется на частоте участия родительской формы в создании новой линии, вышедшей в конкурсное сортоиспытание.

В основе расчета рекомбинационной способности генотипа лежал анализ многолетних данных по комбинациям скрещиваний, сгруппированных относительно сортов, вовлечённых в гибридизацию.

Коэффициент рекомбинационной способности рассчитывали по каждому сорту, как отношение количества созданных комбинаций к количеству сортообразцов дошедших до конкурсного сортоиспытания (формула 1).

$$КРП = \frac{Пл}{Кс} \quad (1),$$

где: КРП – коэффициент рекомбинационного потенциала,

Кс – количество комбинаций скрещиваний с участием родительской формы, из которых выделены перспективные линии,

Пл – количество перспективных линий, дошедших до конкурсного испытания.

Градация и оценка рекомбинационного потенциала представлена в таблице 1.

Таблица 1. Критерии оценки рекомбинационного потенциала
 Table 1. Criteria for assessing the recombination potential

Значение коэффициента КРП / <i>Value of the RPC coefficient</i>	Степень проявления / <i>Degree of manifestation</i>
до 0,10 / before 0.10	очень низкий / very low
0,10-0,29	низкий / low
0,30-0,50	средний / medium
более 0,50 / more than 0.50	высокий / high

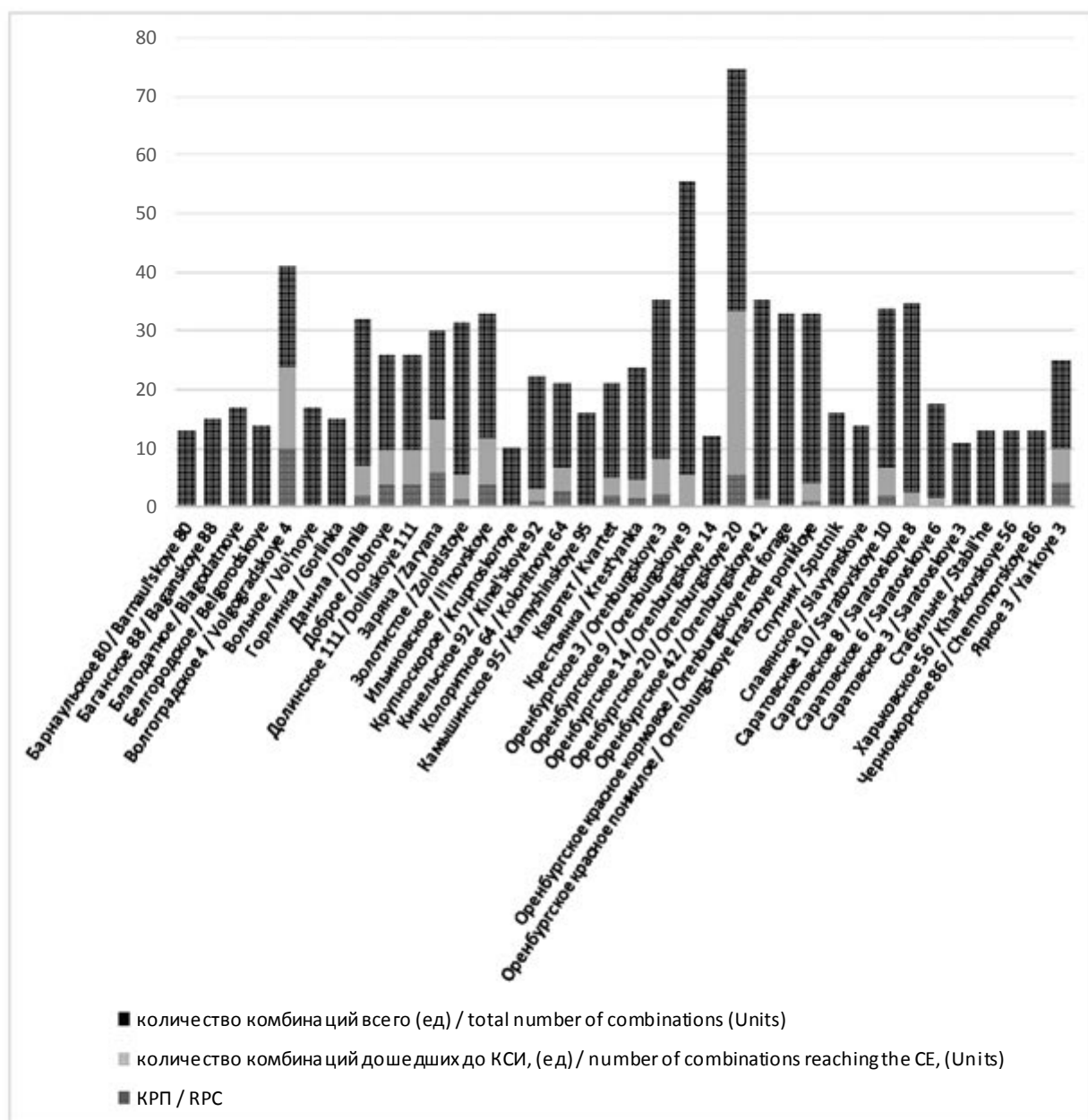
КРП сорта определялся отдельно по прямым и обратным скрещиваниям.

Оборудование и технические средства. Селекционная работа проводилась на базе лаборатории селекции проса посевного в соответствии с методикой государственного сортоиспытания и с использованием оборудования ЦКП БСТ РАН (<http://цкп-бст.рф>).

Статистическая обработка. Обработку полученных данных выполняли методом дисперсионного анализа (Доспехов Б.А., 1985). Статистический анализ проводили с использованием компьютерной программы «Microsoft Excel» («Microsoft», США).

Результаты исследования.

Результаты анализа комбинаций простых скрещиваний и выхода перспективных линий в конкурсное испытание приведены на рисунках 1 и 2. За 25-летний период в гибридизацию было вовлечено 36 сортов. Рекомбинационный потенциал отличался в зависимости от сорта и варьировал в прямых скрещиваниях от 0,03 до 0,82, в обратных – от 0,05 до 0,6. Высокий КРП в прямых скрещиваниях отмечен у сортов: Волгоградское 4 – 0,82 ($P \leq 0.05$), Заряна – 0,6 ($P \leq 0.05$), средний у сортов Яркое 3 – 0,4, Ильиновское – 0,38, Доброе – 0,38, Долинское 111 – 0,38. Из 36 сортов у 16 он был равен нулю. В обратных скрещиваниях высокий коэффициент рекомбинационного потенциала имели сорта: Багановское 88 – 0,6, Саратовское 3 – 0,59 ($P \leq 0.05$), средний: Славянское – 0,38. Из 35 сортов 12 в обратных скрещиваниях имели КРП, равный нулю.



Примечание: КСИ – конкурсное испытание

Note: CT – competitive test

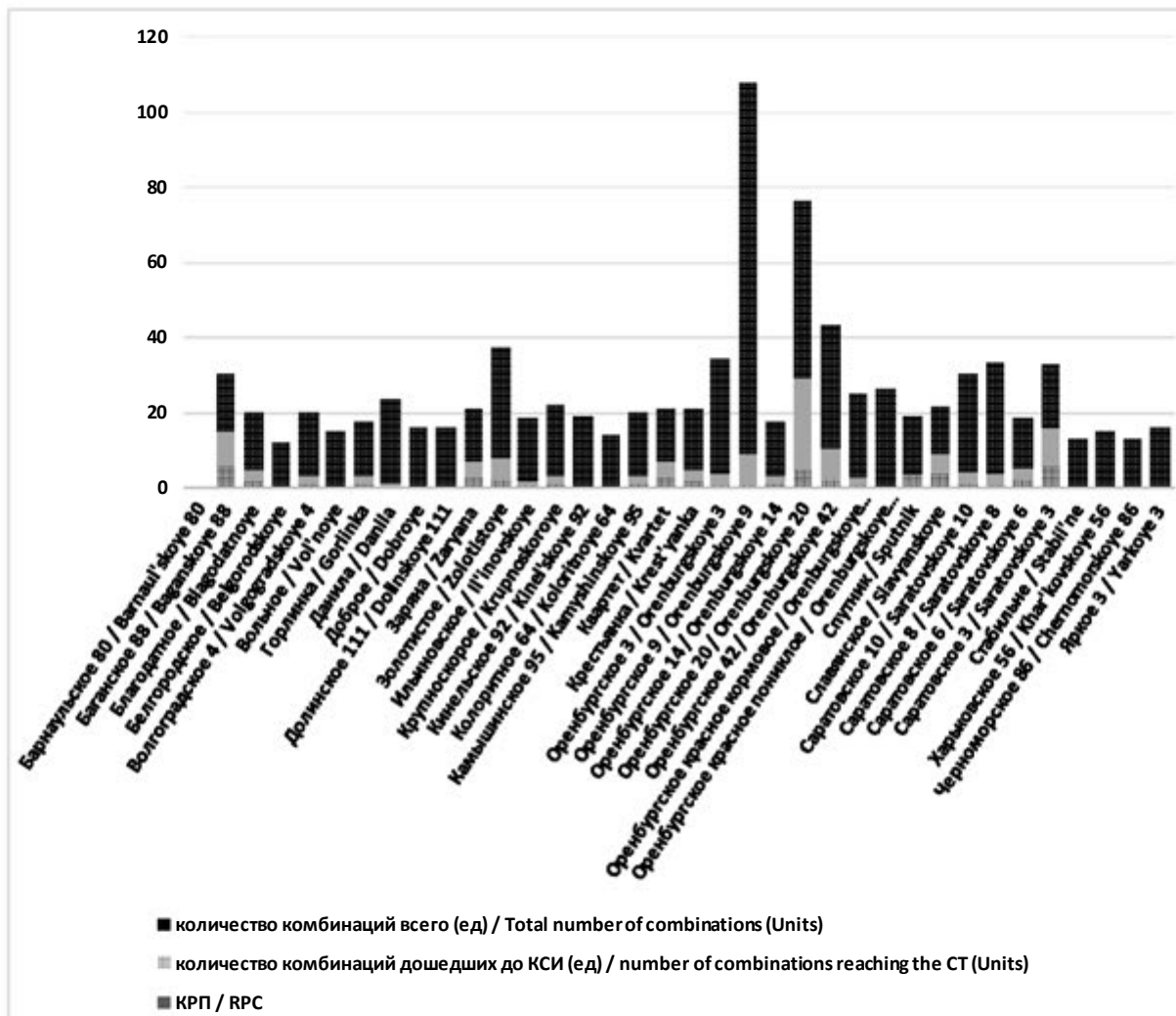
Рисунок 1. Информация по количеству прямых скрещиваний и коэффициенту рекомбинационного потенциала базового селекционного материала

Figure 1. Information on the number of direct crosses and the coefficient of recombination potential of the basic breeding material

Необходимо отметить, что использование одного сорта при разных видах скрещиваниях даёт разное значение коэффициента рекомбинационной способности. Так, сорт проса Волгоградское 4, имея высокий КРП в прямых скрещиваниях, не отличился высоким рекомбинационным по-

тенциал в обратных, а Барнаульское 80 при очень высоком КРП в обратном скрещивании не дал перспективного потомства при использовании его в качестве материнской линии.

Из сортов оренбургской селекции высокую рекомбинационную способность имел сорт Оренбургское 20, причём это относится как к прямым (КРП – 0,55, $P \leq 0.05$), так и обратным (КРП – 0,51, $P \leq 0.05$) скрещиваниям.



Примечание: КСИ – конкурсное испытание

Note: CT – competitive test

Рисунок 2. Информация по количеству обратных скрещиваний и коэффициенту рекомбинационного потенциала базового селекционного материала
Figure 2. Information on the number of reverse crosses and the coefficient of recombination potential of the basic breeding material

Обсуждение полученных результатов.

Успешность селекционного процесса во многом зависит от базового родительского материала. Знание рекомбинационной способности даёт возможность более полно оценить вклад генотипа в формообразовательный процесс селекции для конкретных условий среды. Эффективность использования КРП для оценки родительских форм отмечается при работе с такими культурами, как

кукуруза, картофель, ячмень (Гуторова О.В. и Зайцев С.А., 2022; Компанеев Е.В. и др., 2017; Гудзенко В.Н. и Полищук Т.П., 2018).

Уровень рекомбинационной способности сорта зависит от многих факторов и может быть как высоким, так и низким (Pesaraklu S et al., 2016). В нашей работе, как и в других исследованиях (Бочкарева Э.Б. и др., 2020; Шанина Е.П. и др., 2016), на значения рекомбинационной способности влиял вид скрещивания.

Таким образом, оценка перспективности исходного материала по выходу селекционных номеров в конкурсное испытание может стать дополнительным инструментом в подборе родительских форм для гибридизации по видам скрещивания. На основании полученных результатов выявлено, что сорта проявляют разную рекомбинационную способность в зависимости от вида скрещивания (прямое или обратное).

Заключение.

Для повышения эффективности селекционного процесса при получении новых гибридов необходимо привлекать сорта с высоким и средним уровнем КРП. Сорта: Волгоградское 4, Заряна, Яркое 3, Ильиновское, Доброе, Долинское 111 целесообразно использовать в качестве материнской формы, а сорта: Багановское 88, Саратовское 3, Славянское – в качестве отцовской. Оренбургское 20, как исходный материал, является универсальным сортом, его можно использовать в качестве родительской формы как при прямых, так и при обратных скрещиваниях.

Список источников

1. Гудзенко В.Н., Полищук Т.П. Оценка генетических компонентов и комбинационной способности многорядного озимого ячменя по длине колоса в условиях Лесостепи Украины // Plant Varieties Studying and Protection. 2018. Т. 14. № 1. С. 52-57. [Hudzenko VM, Polischuk TP. Evaluation of genetic components and combining ability for spike length in winter six-rowed barley under conditions of Forest-Steppe of Ukraine. Plant Varieties Studying and Protection. 2018;14(1):52-57. (*In Russ.*)]. doi: 10.21498/2518-1017.14.1.2018.126505
2. Гуторова О.В., Зайцев С.А. Комбинационная способность линий кукурузы и генетический контроль морфометрических параметров // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2022. Т. 22. № 2. С. 187-192. [Gutorova OV, Zaitsev SA. Combination ability of corn lines and genetic control of morphometric parameters. Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Chemistry. Biology. Ecology. 2022;22(2):187-192. (*In Russ.*)]. doi: 10.18500/1816-9775-2022-22-2-187-192
3. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта: (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с. [Dospikhov BA. Metodika polevogo opyta: (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniy). 5-e izd., dop. i pererab. Moscow: Agropromizdat; 1985:351 p. (*In Russ.*)].
4. Интродуцирование новых генисточников проса посевного для селекции в условиях Среднего Поволжья / А.К. Антимонов, О.Н. Антимонова, Л.Ф. Сыркина, Л.А. Косых // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2018. № 11-1. С. 154-157. [Antimonov AK, Antimonova ON, Syrkina LF, Kosykh LA. Introduction new gene sources broomcorn millet for breeding under the conditions in the middle Volga region. International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2018;11(1):154-157. (*In Russ.*)]. doi: 10.24411/2500-1000-2018-10174
5. Комбинационная способность новых ЦМС-линий рапса озимого (*Brassica napus* L.) селекции ВНИИМК / Э.Б. Бочкарева, Е.А. Стрельников, Л.А. Горлова, В.В. Сердюк // Масличные культуры. 2020. № 4(184). С. 18-23. [Bochkareva EB, Strelnikov EA, Gorlova LA, Serdyuk VV. Com-

binning ability of the new CMS-lines of winter rapeseed (*Brassica napus* L.) bred at VNIIMK. Oil Crops. 2020;4(184):18-23. (*In Russ.*). doi: 10.25230/2412-608X-2020-4-184-18-23

6. Комбинационная способность сортов ячменя ярового в системе прямых диаллельных скрещиваний / Е.В. Компанец и др. // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2017. Т. 21. № 5. С. 537-544. [Kompanets EV et al. Combining ability of spring barley varieties in the direct diallel cross system. Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2017;21(5):537-544. (*In Russ.*)]. doi: 10.18699/VJ17.271

7. Регер Н.С., Бесалиев И.Н., Панфилов А.Н. Особенности формирования продуктивности посевов гороха и овса при применении биостимуляторов в засушливых условиях оренбургского Предуралья // Животноводство и кормопроизводство. 2022. Т. 105. № 1. С. 171-181. [Reger NS, Besaliev IN, Panfilov AL. Peculiarities of productivity formation of pea crops and oats after using biostimulants in arid conditions of the Orenburg Cis-Urals. Animal Husbandry and Fodder Production. 2022;105(1):171-181. (*In Russ.*)]. doi: 10.33284/2658-3135-105-1-171

8. Сокурова Л.Х. Значение и изучение исходного материала проса посевного для условий Кабардино-Балкарской республики // Зернобобовые и крупяные культуры. 2022. № 4(44). С. 116-124. [Sokurova LH. Creation and evaluation of the source material of millet for the conditions of the Kabardino-Balkarian republic. Legumes and Groat Crops. 2022;4(44):116-124. (*In Russ.*)]. doi: 10.24412/2309-348X-2022-4-116-124

9. Сокурова Л.Х. Создание и оценка исходного материала для селекции проса в Кабардино-Балкарии // Научная жизнь. 2019. Т. 14. № 10(98). С. 1522-1529. [Sokurova LKh. Creation and evaluation of source material for breeding millet in Kabardino-Balkaria. Scientific Life. 2019;14(10-98):1522-1529. (*In Russ.*)]. doi: 10.35679/1991-9476-2019-14-10-1522-1529

10. Сурков А.Ю. Итоги и перспективы селекции проса в Воронежском НИИСХ имени В.В. Докучаева // Зернобобовые и крупяные культуры. 2014. № 2(10). С. 56-59. [Surkov AYU. Results and prospects of selection of millet in Voronezh scientific research institute of agricultural of name of V.V. Dokuchayev. Legumes and Groat Crops. 2014;2(10):56-59. (*In Russ.*)].

11. Тихонов Н.П., Тихонова Т.В., Милкин А.А. Адаптивность и урожайность сортов проса селекции ФГБНУ «НИИСХ Юго-Востока» // Зернобобовые и крупяные культуры. 2018. № 4(28). С. 78-82. [Tikhonov NP, Tikhonova TV, Milkin AA. Adaptivity And productivity of millet varieties bred by the FGBNU "Agricultural Research Institute of South-East". Legumes and Groat Crops. 2018;4(28):78-82. (*In Russ.*)]. doi: 10.24411/2309-348X-2018-11053

12. Тишков Н.И. Адаптивная и рекомбинационная способность сортов // Селекция ярового ячменя, яровой пшеницы и проса посевного для условий Оренбургской области. Оренбург, 2011. С. 18-25. [Tishkov NI. Adaptivnaja i rekombinacionnaja sposobnost' sortov. Selekcija jarovogo jachmenja, jarovoj pshenicy i prosa posevnogo dlja uslovij Orenburgskoj oblasti. Orenburg; 2011:18-25. (*In Russ.*)].

13. Устойчивость образцов ячменя оренбургской селекции к основным заболеваниям / А.А. Новикова, О.С. Гречишкина, А.А. Зоров, О.В. Богданова // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106. № 2. С. 226-238. [Novikova AA, Grechishkina OS, Zorov AA, Bogdanova OV. Resistance of barley samples of the Orenburg selection to major diseases. Animal Husbandry and Fodder Production. 2023;106(2):226-238. (*In Russ.*)]. doi: 10.33284/2658-3135-106-2-226

14. Шанина Е.П., Клюкина Е.М., Стафеева М.А. Анализ комбинационной способности исходных родительских форм картофеля по признаку продуктивности // Картофелеводство. 2016. Т. 24. № 1. С. 56-62. [Shanina EP, Klyukina EM, Stafeeva MA. Combining ability analysis of initial parental forms of potatoes on the basis of productivity. Potato Growing. 2016;24(1):56-62. (*In Russ.*)].

15. Pesaraklu S, Soltanloo H, Ramezanpour SS et al. An estimation of the combining ability of barley genotypes and heterosis for some quantitative traits. Iran Agric Res. 2016;35(1):73-80. doi: 10.22099/IAR.2016.3653

References

1. Hudzenko VM, Polischuk TP. Evaluation of genetic components and combining ability for spike length in winter six-rowed barley under conditions of Forest-Steppe of Ukraine. *Plant Varieties Studying and Protection*. 2018;14(1):52-57. doi: 10.21498/2518-1017.14.1.2018.126505
2. Gutorova OV, Zaitsev SA. Combination ability of corn lines and genetic control of morphometric parameters. *Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Chemistry. Biology. Ecology*. 2022;22(2):187-192. doi: 10.18500/1816-9775-2022-22-2-187-192
3. Dospekhov BA. Methodology of field experiment: (with the basics of statistical processing of research results). 5th edition, supplement and revision. Moscow: Agropromizdat; 1985:351.
4. Antimonov AK, Antimonova ON, Syrkina LF, Kosykh LA. Introduction new gene sources broomcorn millet for breeding under the conditions in the middle Volga region. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2018;11(1):154-157. doi: 10.24411/2500-1000-2018-10174
5. Bochkareva EB, Strelnikov EA, Gorlova LA, Serdyuk VV. Combining ability of the new CMS-lines of winter rapeseed (*Brassica napus* L.) bred at VNIIMK. *Oil Crops*. 2020;4(184):18-23. doi: 10.25230/2412-608X-2020-4-184-18-23
6. Kompanets EV et al. Combining ability of spring barley varieties in the direct diallel cross system. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2017;21(5):537-544. doi: 10.18699/VJ17.271
7. Reger NS, Besaliev IN, Panfilov AL. Peculiarities of productivity formation of pea crops and oats after using biostimulants in arid conditions of the Orenburg Cis-Urals. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;105(1):171-181. doi: 10.33284/2658-3135-105-1-171
8. Sokurova LH. Creation and evaluation of the source material of millet for the conditions of the Kabardino-Balkarian republic. *Legumes and Groat Crops*. 2022;4(44):116-124. doi: 10.24412/2309-348X-2022-4-116-124
9. Sokurova LKh. Creation and evaluation of source material for breeding millet in Kabardino-Balkaria. *Scientific Life*. 2019;14(10-98):1522-1529. doi: 10.35679/1991-9476-2019-14-10-1522-1529
10. Surkov AY. Results and prospects of selection of millet in Voronezh scientific research institute of agricultural of name of V.V. Dokuchayev. *Legumes and Groat Crops*. 2014;2(10):56-59.
11. Tikhonov NP, Tikhonova TV, Milkin AA. Adaptivity And productivity of millet varieties bred by the FGBNU "Agricultural Research Institute of South-East". *Legumes and Groat Crops*. 2018;4(28):78-82. doi: 10.24411/2309-348X-2018-11053
12. Tishkov NI. Adaptive and recombination ability of varieties. Breeding of spring barley, spring wheat and sown millet for the conditions of the Orenburg region. Orenburg; 2011:18-25.
13. Novikova AA, Grechishkina OS, Zorov AA, Bogdanova OV. Resistance of barley samples of the Orenburg selection to major diseases. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(2):226-238. doi: 10.33284/2658-3135-106-2-226
14. Shanina EP, Klyukina EM, Stafeeva MA. Combining ability analysis of initial parental forms of potatoes on the basis of productivity. *Potato Growing*. 2016;24(1):56-62.
15. Pesaraklu S, Soltanloo H, Ramezanpour SS et al. An estimation of the combining ability of barley genotypes and heterosis for some quantitative traits. *Iran Agric Res*. 2016;35(1):73-80. doi: 10.22099/IAR.2016.3653

Информация об авторах:

Рамиль Дамирович Камалеев, кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией селекции проса посевного, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460051, г. Оренбург, пр. Гагарина, 27/1.

Антонина Александровна Новикова, кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией селекционно-генетических исследований в растениеводстве, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460051, г. Оренбург, пр. Гагарина, 27/1, тел.: 8922888448.

Information about the authors:

Ramil D Kamaleev, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Head of the Laboratory for Seed millet breeding, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 27/1 Gagarin Ave., Orenburg, 460051.

Antonina A Novikova, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Head of the Laboratory for Breeding and Genetic Research in Plant Growing, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 27/1 Gagarin Ave., Orenburg, 460051, tel.: 89228884481.

Статья поступила в редакцию 27.03.2024; одобрена после рецензирования 17.04.2024; принята к публикации 09.09.2024.

The article was submitted 27.03.2024; approved after reviewing 17.04.2024; accepted for publication 09.09.2024.