

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СЕЛЕКЦИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Научная статья
УДК 633.15:664.25
DOI: 10.30901/2227-8834-2024-3-166-179



Оценка содержания крахмала в зерне и реакции на М- и С-типы ЦМС высококрахмалистых гибридов кукурузы

М. Р. Фирсова¹, Б. Р. Шомахов², Р. С. Кушхова², З. Т. Хаширова², Р. А. Кудаев², А. Х. Гяургиев², С. П. Аппаев², А. М. Кагермазов², А. В. Хачидогов², А. И. Бузуртанов³, К. Ш. Бадургова³, М. А. Базгиев³, В. Г. Гольдштейн⁴, В. И. Хорева¹, Э. Б. Хатефов¹

¹ Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

² Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, Институт сельского хозяйства, Нальчик, Россия

³ Ингушский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, Сунжа, Россия

⁴ Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалосодержащего сырья, Московская область, Россия

Автор, ответственный за переписку: Эдуард Балилович Хатефов, haed1967@rambler.ru

Актуальность. Рост производства нативного и модифицированного крахмала из кукурузы требует обеспечения сырьем с высоким содержанием крахмала в зерне.

Материалы и методы. Проведены двухлетние испытания 780 экспериментальных простых гибридов высококрахмалистой кукурузы, полученных на стерильных линиях с М- и С-типами ЦМС. Определение крахмала в зерне линий и их гибридов проведено методом ИК-спектromетрии, содержание нативного крахмала в зерне лучших по урожайности гибридов проведено во ВНИИ крахмала и переработки крахмалосодержащего сырья по методу, предложенному Л. П. Носовской с соавторами, определена реакция на ЦМС по шкале Г. С. Галеева.

Результаты. Установлено варьирование содержания крахмала в зерне от 58% до 72% СВ по всей выборке. По данным ИК-спектromетрии выделены 22 гибрида с высоким (72,03–72,67%) содержанием крахмала и 5 гибридов, перспективных для глубокой переработки зерна, сочетающих высокое содержание белка (10,3–13,53%) и масла (3,77–5,03%) с высоким содержанием крахмала (69,02–70,4%) в зерне. Извлечение нативного крахмала по методу Л. П. Носовской показало, что содержание крахмала у 68 лучших гибридов находится в пределах от 70,03 до 71,95% СВ. Коллекция ранжирована по принадлежности к основным гетерозисным группам: Iowa Dent – 57 линий, Stiff Stalk Synthetic – 26 линий, Lancaster – 28 линий. Выделены 33 и 6 линий закрепителей, 9 и 8 линий восстановителей М- и С-типов ЦМС соответственно. По группам спелости ФАО гибриды распределились на ФАО 200–299 – 14 комбинаций, ФАО 300–399 – 7 комбинаций, ФАО 400–449 – 21 комбинация и ФАО 450–500 – 29 комбинаций.

Выводы. Хозяйственная и селекционная оценка 68 лучших комбинаций линий высококрахмалистой кукурузы со стерильными тестерами показала их перспективность для производства нативного крахмала не ниже 70–72% СВ. Также выделены 5 комбинаций линий для получения нативного крахмала (69,02–70,4% СВ) и побочной продукции в виде белка (10,3–13,5% СВ) и масла (3,77–5,03% СВ) при глубокой переработке зерна.

Ключевые слова: *Zea mays* L., кукурузный крахмал, глубокая переработка зерна, ЦМС, закрепители стерильности, восстановители фертильности пыльцы

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту № FGEM-2022-0009 «Структурирование и раскрытие потенциала наследственной изменчивости мировой коллекции зерновых и крупяных культур ВИР для развития оптимизированного генбанка и рационального использования в селекции и растениеводстве».

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Фирсова М.Р., Шомахов Б.Р., Кушхова Р.С., Хаширова З.Т., Кудаев Р.А., Гяургиев А.Х., Аппаев С.П., Кагермазов А.М., Хачидогов А.В., Бузуртанов А.И., Бадургова К.Ш., Базгиев М.А., Гольдштейн В.Г., Хорева В.И., Хатефов Э.Б. Оценка содержания крахмала в зерне и реакции на М- и С-типы ЦМС высококрахмалистых гибридов кукурузы. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(3):166-179. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-3-166-179

© Фирсова М.Р., Шомахов Б.Р., Кушхова Р.С., Хаширова З.Т., Кудаев Р.А., Гяургиев А.Х., Аппаев С.П., Кагермазов А.М., Хачидогов А.В., Бузуртанов А.И., Бадургова К.Ш., Базгиев М.А., Гольдштейн В.Г., Хорева В.И., Хатефов Э.Б., 2024

DOMESTIC PLANT BREEDING AT THE PRESENT STAGE

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-3-166-179

Assessment of grain starch content and responses to CMS-S and CMS-C in high-starch maize hybrids

Milana R. Firsova¹, Beslan R. Shomakhov², Rita S. Kushkhova², Zinaida T. Khashirova², Ruslan A. Kudaev², Azamat Kh. Gyaurgiev², Safar P. Appaev², Alan M. Kagermazov², Azamat V. Khachidogov², Aslanbek I. Buzurtanov³, Kulsum Sh. Badurgova³, Magomed A. Bazgiev³, Vladimir G. Goldstein⁴, Valentina I. Khoreva¹, Eduard B. Khatefov¹

¹ N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia

² Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Nalchik, Russia

³ Ingush Scientific Research Institute of Agriculture, Sunzha, Russia

⁴ Russian Potato Research Center, All-Russian Research Institute of Starch and Starch-Containing Raw Materials Processing, Moscow Province, Russia

Corresponding author: Eduard B. Khatefov, haed1967@rambler.ru

Background. Increasing the production of native and modified starch from maize requires raw materials with high starch content in grain.

Materials and methods. An experimental panel of 780 simple high-starch maize hybrids produced with CMS-S and CMS-C lines underwent two-year testing. Starch content in the grain of the lines and their hybrids was assessed with IR spectrometry. Native starch content in the grain of hybrids with highest yields was measured at the All-Russian Research Institute of Starch and Starch-Containing Raw Materials Processing using the method proposed by L. P. Nosovskaya with coauthors. Responses to CMS were scored according to G. S. Galeev's scale.

Results. Grain starch content was found to vary from 58% to 72% DMB throughout the tested panel. IR spectrometry helped to identify 22 hybrids with high (72.03–72.67%) starch content, and 5 hybrids promising for deep grain processing, combining high protein (10.3–13.53%) and oil (3.77–5.03%) levels with high starch content (69.02–70.4%) in their grain. Native starch extraction using L. P. Nosovskaya's method showed that grain starch content in the best 68 hybrids ranged from 70.03 to 71.95% DMB. The collection was ranked according to the main heterotic groups: 57 lines of Iowa Dent, 26 lines of Stiff Stalk Synthetic, and 28 lines of Lancaster. For CMS-S and CMS-C types, 33 and 6 maintainers, and 9 and 8 restorers were selected, respectively. The hybrids were distributed across the following FAO maturity groups for maize: FAO 200–299 (14 hybrids), FAO 300–399 (7), FAO 400–449 (21), and FAO 450–500 (29).

Conclusion. Assessing agronomic and breeding prospects of the best 68 hybrids between high-starch maize lines and sterile testers proved their potential for producing native starch to at least 70–72% DMB. Five hybrids were identified as promising for yielding native starch (69.02–70.4% DMB), as well as protein (10.3–13.5% DMB) and oil (3.77–5.03% DMB) by-products during deep grain processing.

Keywords: *Zea mays* L., maize starch, deep grain processing, CMS, sterility maintainer, fertility restorers

Acknowledgements: the research was performed within the framework of the state task according to the theme plan of VIR, Project No. FGEM-2022-0009 “Structuring and disclosing the potential of hereditary variation in the global collection of cereal and grain crops at VIR for the development of an optimized genebank and its sustainable utilization in plant breeding and crop production”.

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Firsova M.R., Shomakhov B.R., Kushkhova R.S., Khashirova Z.T., Kudaev R.A., Gyaurgiev A.Kh., Appaev S.P., Kagermazov A.M., Khachidogov A.V., Buzurtanov A.I., Badurgova K.Sh., Bazgiev M.A., Goldstein V.G., Khoreva V.I., Khatefov E.B. Assessment of grain starch content and responses to CMS-S and CMS-C in high-starch maize hybrids. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(3):166-179. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-3-166-179

Введение

Крахмал относится к полимерам, получаемым из растительного сырья. За период 2017–2021 гг. его производство в РФ увеличилось на 44% – с 243 до 349 тыс. т. По данным BusinesStat (2022), показатель темпов ежегодного прироста относительно предыдущих лет составил 4,9–15,7%. Рост производства увеличивался в соответствии со спросом со стороны ключевых потребляющих отраслей промышленности: пищевой, целлюлозно-бумажной, химико-фармацевтической, строительной, нефтегазовой. При производстве крахмала преобладающим является кукурузный. Доля крахмала, полученного из других культур, составляла в среднем 34,2%, доля пшеничного – 13,8%, на картофельный крахмал приходилось всего 3,1%. В крахмальной промышленности наблюдается дефицит сортов и гибридов кукурузы с высоким содержанием крахмала в зерне, а также источников особо ценных форм крахмала (амилопектиновый, высокоамилозный) (BusinesStat..., 2022). Создание линий и гибридов высококрахмалистой кукурузы обеспечит импортозамещение нативного и модифицированного крахмала в РФ.

Кукуруза была первой культурой, на которой успешно применили цитоплазматическую мужскую стерильность (ЦМС) для массового производства коммерчески доступных гибридных семян (Kim, Zhang, 2018), поэтому промышленная селекция и семеноводство гибридов кукурузы невозможны без использования ЦМС на материнских формах. Источники ЦМС, разрешенные к использованию в семеноводстве кукурузы после эпифитотий на цитоплазме Т-типа в 70-х годах XX века и ее запрета к использованию, сосредоточены в основном на М-типе, чуть меньше – на С-типе ЦМС. В отличие от Т-типа, М- и С-типы ЦМС не поражаются возбудителем *Helminthosporium maydis*, Race T и его токсинами (Ullstrup, 1972). ЦМС наследуется через материнскую цитоплазму, характеризуется неспособностью производить функциональную пыльцу при определенном взаимодействии ядерных и цитоплазматических генов. Доминантные ядерные гены, называемые восстановителями фертильности (*Rf*-), могут противодействовать эффекту ЦМС стерильной цитоплазмы, а рецессивные ядерные гены (*rfr*) не обладают такой устойчивостью и закрепляют стерильность. Для восстановления фертильности М-типа ЦМС достаточно одного доминантного гена *Rf3*, расположенного на хромосоме 2 (Laughnan, Gabay, 1978; Kamps, Chase, 1997; Tie et al., 2006; Zhang et al., 2006). Кроме основного гена-восстановителя, имеется дополнительный локус, участвующий в восстановлении ЦМС М-типа, такой как *Rf9* (Gabay-Laughnan et al., 2009). Стерильность цитоплазмы М-типа нестабильна и очень чувствительна к факторам окружающей среды, что затрудняет ее широкое применение в сельском хозяйстве (Weider et al., 2009). Цитоплазматическая мужская стерильность типа С – один из трех основных типов ЦМС у кукурузы – имеет многообещающие перспективы применения в производстве гибридных семян. Восстановление фертильности контролируется двумя доминантными генами, *Rf4* и *Rf5*, которые расположены на хромосомах 8 и 5 соответственно, способствуя полному восстановлению фертильности ЦМС С-типа (Sisco, 1991; Tang et al., 2001; Jaqueth et al., 2020).

Зерно кукурузы состоит из 61–78% крахмала в пересчете на сухое вещество (СВ), пентозанов (около 10% СВ), белка (6–12% СВ) и липидов (3–6% СВ) (Watson, 2003;

Sinha et al., 2011). Зерно кукурузы как сырье очень технологично за счет того, что оно легко сушится, длительно хранится и легко транспортируется. Благодаря этим свойствам кукуруза является почти идеальной зерновой культурой для получения крахмала (Zhang et al., 2021).

Улучшение количества крахмала стало одной из важнейших задач селекции кукурузы на качество зерна. Селекция кукурузы на качество зерна неразрывно связана как с получением высоких урожаев, так и с улучшением его свойств для питания и переработки (Burrell, 2003; Pollak et al., 2005; Pajić et al., 2010; Kaur et al., 2012).

Биотехнологии, наряду с информационными и нанотехнологиями, признаны ключевым направлением укрепления инновационного сектора экономики страны. В процессе глубокой переработки зерна кукурузы при производстве крахмала образуется много побочных продуктов, богатых органическими ингредиентами и питательными веществами, таких как кукурузные отруби, кукурузные зародыши, кукурузный экстракт, кукурузный глютен и т. д. (Abu-Ghannam, Balboa, 2018; Goldstein et al., 2018). Извлечение крахмала из зерна кукурузы при глубокой переработке осуществляется путем замачивания в воде с добавлением сернистой кислоты на 24–48 часов (Zheng et al., 2013; Somavat et al., 2021). Такая технология позволяет получать дополнительную прибыль с каждой тонны продукции. В этой связи селекционеры уделяют большое внимание как содержанию крахмала в зерне, так и побочным продуктам, получаемым при его производстве.

Создание отечественных сортов и гибридов высококрахмалистой кукурузы является одним из перспективных направлений гибридной селекции, способствующей импортозамещению главнейших возобновляемых сырьевых источников.

Целью исследования является создание отечественных гибридов кукурузы с высоким и повышенным содержанием крахмала в зерне как источников нативного крахмала при глубокой переработке зерна кукурузы.

Материалы и методы

Для создания исходного селекционного материала использовали образцы коллекции высококрахмалистой кукурузы ВИР (628 образцов), которые были получены в тест-кроссах между перспективными инбредными линиями (119 образцов) и 16 линиями (тестеры) с С- и М-типами ЦМС, хорошей общей комбинационной способностью, относящимися к трем основным гетерозисным группам кукурузы (Iowa Dent, Lancaster, Stiff Stalk Synthetic) (Hallauer, Russell, 1988). Изученные образцы созданы в результате селекции ООО ССЦ «ОТБОР» и ВИР.

По результатам биохимического анализа зерна и фенотипической оценки в полевых условиях растений исходного селекционного материала в 2019–2020 гг. выделили стержневую коллекцию кукурузы, состоящую из 245 образцов с высоким содержанием крахмала в зерне из 12 тестеров, адаптированных к агроклиматическим условиям степной зоны Кабардино-Балкарской Республики (КБР). Стержневая коллекция была представлена образцами с содержанием крахмала в зерне не ниже 69%, а также образцами, у которых обнаружилось высокое содержание крахмала в сочетании с высоким содержанием белка и масла в зерне, с оптимальной для Северо-Кавказского федерального округа группой спелости по классификации ФАО (FAO) (от 200 до 500), с устойчивостью к основным болезням кукурузы (пузырчатая головня,

фузариоз початка) на естественном инфекционном фоне, с устойчивостью к полеганию при густоте стояния растений не менее 62 тыс. раст./га в условиях орошения в степной зоне КБР и другими ценными признаками растений.

В 2020 г. проведены скрещивания линий-тестеров с С- и М-типами ЦМС в качестве материнских растений с линиями стержневой коллекции в качестве отцовских растений (♀тестер × ♂линия). Реакцию тест-кроссов на ЦМС оценивали по шкале Г. С. Галеева (Shmaraev, Matveeva, 1985). Все гибриды разделили на четыре условные группы по группе спелости ФАО. Для определения урожайности в группе спелости ФАО 200–299 использовали в качестве стандарта гибрид кукурузы Ирида, для группы спелости 300–399 – гибрид Краснодарский 291 СВ, для группы спелости 400–449 – гибрид Краснодарский 385 МВ, для группы спелости 450–500 – гибрид Краснодарский 507 МВ. В таблице 1 представлено содержание крахмала в зерне самых высокоурожайных гибридных комбинаций, которые в оба года испытаний превысили по урожайности зерна стандарт более чем на одно значение наименьшей существенной разницы (НСР₀₅).

Испытания гибридов, полученных от скрещивания со стерильными тестерами, проводили в степной зоне КБР на селекционном участке ООО ССЦ «ОТБОР» в 2021–2022 гг. Почвы селекционного участка представлены слабощелочными карбонатными черноземами, тяжелосуглинистыми, малогумусными, расположенными на слабоволнистой равнине. Содержание гумуса – 3%. предше-

ственник – горох. После уборки кукурузы проводили дискование в два следа, затем глубокое рыхление на глубину 30 см. Весной – боронование, внесение удобрений (РУМ Сульфоаммофос N20:P20:S12) методом разбрасывания с нормой 150 кг/га в физическом весе под первую культивацию. Вносили почвенный гербицид «Позитив» с нормой 3 л/га. Посев вели селекционной сеялкой «Клен 2,8» на глубину 6 см с густотой 60 000 семян/га. Длина деланки – 7 м, ширина – 1,4 м, площадь – 9,8 м², повторность 3-кратная. За период вегетации проведены: одна гербицидная обработка («Приоритет» 1,3 л/га + «Дианат» 0,5 л/га), одна междурядная культивация, 2 полива.

Уборку гибридных участков проводили селекционным комбайном Wintersteiger Delta. Посев – в оптимальные сроки (апрель – май) при температуре почвы на глубине сева +12°C. Все скрещивания проводились вручную с использованием пергаментных изоляторов, сбор и учет урожая селекционного материала проводился вручную.

Анализ содержания основных биохимических компонентов (белок, масло, крахмал) зерна на 780 початках экспериментальных высококрахмалистых гибридов в навеске 100 г методом ИК-спектрии проведен на приборе Infratec 1241 Grain Analyzer (Швеция) в отделе биохимии и молекулярной биологии ВИР. Определение нативного крахмала и выхода побочной продукции проведено в лаборатории качества крахмальной продукции ВНИИ крахмалопродуктов им. В.М. Горбатова. Анализ количества крахмала и побочных продуктов,

Таблица 1. Лучшие гибридные комбинации, показавшие очень высокое содержание крахмала в зерне, определенное методом ИК-спектрии

Table 1. The best hybrid combinations with very high starch content in their grain as identified by means of IR spectrometry

Гибрид / Hybrid	Группа спелости по классификации ФАО / Maturity group according to the FAO classification	Содержание в зерне, % СВ / Content in grain, % DM		
		Белок / Protein	Крахмал / Starch	Масло / Oil
OL 3407 М × МР 231	250	9,65	72,16	3,91
OL 273 М × Л. К. 17	250	10,06	72,02	3,74
OL 273 М × МР 386	250	9,23	72,00	3,95
OL 273 М × Л. К. 10	270	10,02	72,52	3,62
OL 3104 М × д-13р. Оранже.	300	9,46	72,23	3,90
OL 3104 М × 40/25	300	10,1	72,19	3,90
OL 3407 М × 14/99	300	10,29	72,13	4,21
OL 3104 М × 35/5	300	10,9	72,12	3,49
OL 3104 зМ × ИП 99	300	10,4	72,03	3,98
OL 3407 зМ × МР 325	320	8,98	72,65	4,08
А 679 М × МР 387	350	9,13	72,34	4,3
А 679 М × МР 385	350	9,49	72,31	3,85
А 679 М × МР 3816	350	8,73	72,22	3,89
А 679 М × МР 3817	380	9,33	72,38	3,85
А 679 М × МР 3815	380	9,59	72,04	3,49
ГК 26 М × МР 455	400	8,99	72,67	3,92

Таблица 1. Окончание

Table 1. The end

Гибрид / Hybrid	Группа спелости по классификации ФАО / Maturity group according to the FAO classification	Содержание в зерне, % СВ/ Content in grain, % DM		
		Белок / Protein	Крахмал / Starch	Масло / Oil
ГК 26 М × 19/6	400	10,26	72,09	3,34
ГК 26 М × Л. К. 31	400	9,96	72,07	3,86
ГК 26 М × Л. К. 28	400	10,24	72,06	3,72
ГК 26 М × МР 406	400	9,89	72,03	3,95
ГК 26 М × МР 601	420	9,34	72,52	3,90
МР 385 × ОЛ 563 зС	450	10,45	72,07	3,67

получаемых при переработке зерна кукурузы, проведен по ГОСТ 10845-98 «Зерно и продукты его переработки» (GOST 10845-98..., 2009). Переработка зерна на крахмал и побочные продукты осуществлялась на лабораторной установке «завод на столе», разработанной во ВНИИК – филиале ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова в 2015 г. по методу, предложенному Л. П. Носовской (Goldshstein et al., 2015). Образцы кукурузного зерна весом 300 г исследовали в трех повторностях.

Полевые опыты проведены согласно методическим рекомендациям по проведению полевых опытов с кукурузой (Guidelines for conducting..., 1980). Статическую обработку данных проводили по Б. А. Доспехову (Dospikhov, 2011). Фенологические наблюдения и учет урожая зерна проводили по методике ВИР (Shmagaev, Matveeva, 1985), агротехнические мероприятия – по методическим указаниям по производству гибридных семян кукурузы (Sotchenko, 2009). Описание биометрических показателей приведены согласно «Широкому унифицированному классификатору СЭВ вида *Zea mays* L.» (Kukekov, 1977). Уборочную влажность зерна определяли с помощью влагомера «ФАУНА-М». Статистическая обработка полученных данных проводилась при помощи пакета программ Statistica 10.0 (<https://1soft.space/en/statsoft-statistica/>).

Результаты

В результате анализа биохимического состава зерна 780 экспериментальных гибридов крахмалистой кукурузы выделено 530 гибридов, у которых содержания крахмала составило 70–72% при пониженном количестве белка (8–10%) и масла (3–4%) в среднем. В зерне 22 гибридов содержание крахмала варьировало в пределах 72,0–72,67% (табл. 1). Доля успешности селекции высококрахмалистых (не ниже 69%) гибридов в выборке составила 67,9%, а ультравысококрахмалистых (не ниже 72%) – 2,8%.

В ходе работы по результатам ИК-анализа выделили пять гибридных комбинаций в качестве перспективных для глубокой переработки зерна на крахмал (табл. 2). Эта группа гибридов выделена отдельно по той причине, что высокое содержание крахмала обычно сопровождается низким содержанием белка и масла в зерне. В зерне этих пяти гибридов обнаружилось высокое содержание белка (10,3–13,53%) и масла (3,77–5,03%) вместе с относительно высоким содержанием крахмала (69,02–70,4%). Такое соотношение содержания крахмала с содержанием белка и масла является перспективным с высокой рентабельностью для селекции гибридов высококрахмалистой

Таблица 2. Перспективные для глубокой переработки зерна гибриды высококрахмалистой кукурузы, определенные методом Л. П. Носовской с соавторами (Nosovskaya et al., 2018)

Table 2. High-starch maize hybrids promising for deep grain processing, identified according to Nosovskaya et al. (2018)

Гибрид / Hybrid	Группа спелости по классификации ФАО / Maturity group according to the FAO classification	Содержание в зерне, % СВ/ Content in grain, % DM		
		Белок / Protein	Крахмал / Starch	Масло / Oil
ДК 66 × МР 232	200	10,30	70,40	5,03
МР 408 × ОЛ 409 зМ	400	10,40	69,86	5,02
ДК 66 × МР 251	200	13,50	69,02	4,03
ГК 26 зМ × 5027 (48)	400	13,53	69,13	3,95
ДК 66 × МР 355	250	12,40	69,91	3,77

кукурузы, предназначенных для технологии глубокой переработки зерна.

Результаты двухлетних испытаний позволили определить урожайность лучших гибридов в сравнении со стандартами для каждой группы спелости по ФАО. Последующее ранжирование высокоурожайных гибридов по содержанию крахмала в зерне сократило объем выборки до 71 гибрида, у которых содержание крахмала варьировало в пределах от 69 до 71%. Доля успешности селекции гибридов с таким содержанием крахмала в зерне в общей выборке составило 9,1% от общего количества гибридных комбинаций.

Все отцовские линии (71 линия) лучших гибридных комбинаций были ранжированы на принадлежность к трем основным гетерозисным группам кукурузы по значению урожайности в гибридах с тестерами. Тестеры, использованные в качестве материнских форм, были представлены линиями с уже известной гетерозисной группой. Ранжирование коллекции отцовских линий по принадлежности к гетерозисной группе позволит в дальнейшем подбирать оптимальный генотип материнской формы с прогнозируемым гетерозисным эффектом, что

значительно сократит объем бесперспективных гибридных комбинаций. Так, широко известная в мировой селекционной практике линия В73 принадлежит к гетерозисной группе Stiff Stalk Synthetic, которая имеет высокое значение эффекта гетерозиса с линией Мо17, относящейся к гетерозисной группе Lancaster. Линия Гк26 принадлежит к гетерозисной группе Iowa Dent и характеризуется одинаковым значением эффекта гетерозиса как с линиями из группы Lancaster, так и с линиями из гетерозисной группы Stiff Stalk Synthetic. Результаты ранжирования отцовских линий показали, что к гетерозисной группе Iowa Dent относятся 57 линий, к группе Stiff Stalk Synthetic – 28 линий и к группе Lancaster – 26 линий (рис. 1). Остальные 28 линий отнесены к неопределенной либо к смешанной гетерозисной группе.

Распределение лучших высококрахмалистых (70–72% СВ) гибридов по группам спелости показало, что 14 комбинаций принадлежат к группе спелости по ФАО 200–299, 7 комбинаций – к группе 300–399, 21 комбинация – к группе 400–449 и 29 комбинаций – к группе 450–500 (рис 2). Остальные комбинации имели содержание крахмала менее 70% СВ.

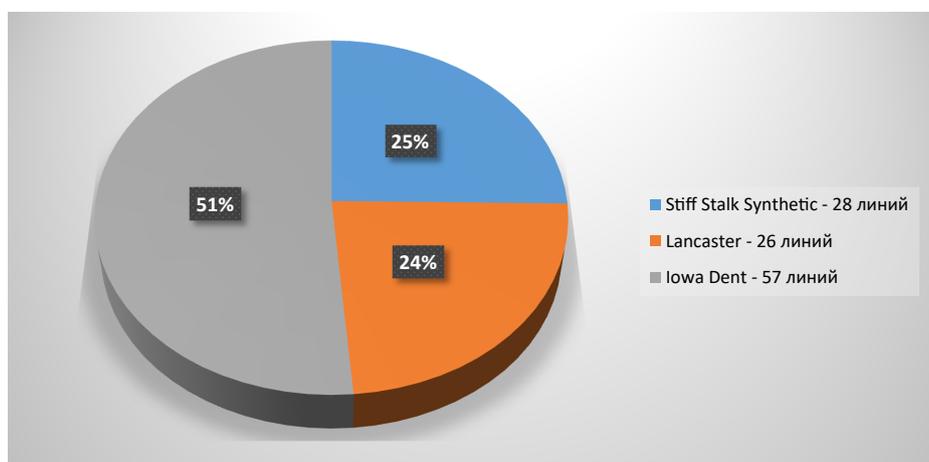


Рис. 1. Ранжирование отцовских линий гибридов кукурузы по основным гетерозисным группам
Fig. 1. Ranking of the paternal lines of maize hybrids according to main heterosis groups

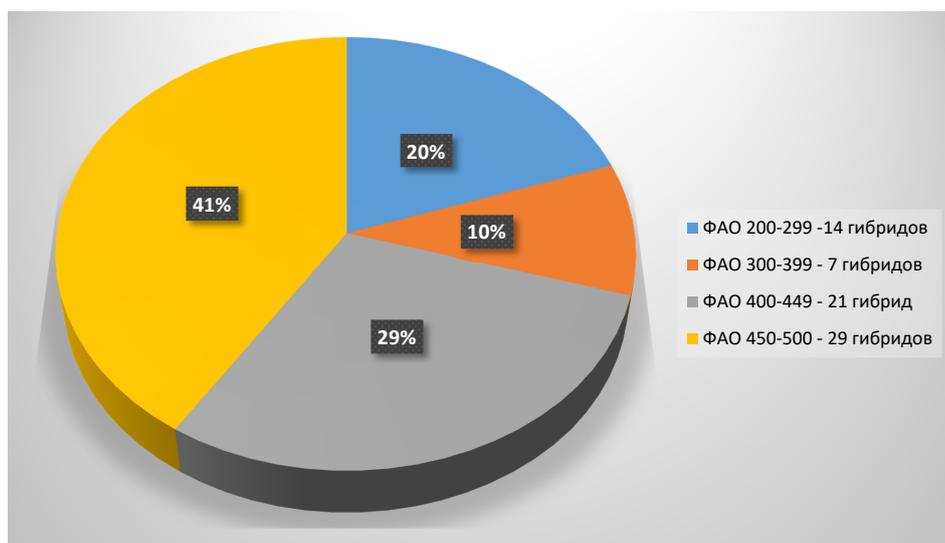


Рис. 2. Ранжирование лучших высококрахмалистых (70–72% СВ) гибридов по группам спелости (по классификации ФАО)
Fig. 2. Ranking of the best high-starch (70–72% DMB) hybrids according to maturity groups (FAO classification)

Содержание крахмала в зерне 39 лучших гибридов, полученных с участием тестеров из группы Stiff Stalk Synthetic, показало, что значения варьировали в пределах от 70,02 до 71,51% СВ (табл. 3). Значения средних значений содержания крахмала по каждому из тестеров показали, что выраженного материнского эффекта на содержание крахмала какого-либо из тестеров не обнаружено. Повышенное содержание крахмала в зерне гибридов чаще наблюдалось в группе спелости по ФАО от 400 до 500 (7 гибридов) и немногим меньше у групп спелости ФАО 200–299 и 300–399, по 2 гибрида в каждой.

Выборка гибридных комбинаций с гетерозисной группой Lancaster, превысивших пороговое значение содержания крахмала, была представлена 14 гибридами, содержание крахмала которых варьировало в пределах 70,03–71,28% СВ. Средние значения по тестерам также не показали влияния какой-либо материнской линии на накопление крахмала в зерне. Все средние значения были равными, в пределах 70,56–70,89% СВ. Значение содержания крахмала в зерне 71% и выше обнаружено у 2 линий раннеспелой группы (ФАО 200–299 и 300–399), показавших 71,17 и 71,28% СВ соответственно.

Таблица 3. Значения содержания крахмала (выше 69%) в зерне лучших тест-кроссов с тестерами, принадлежащими к гетерозисной группе кукурузы Stiff Stalk Synthetic

Table 3. Starch content values (above 69%) in the grain of the best test crosses with testers belonging to the Stiff Stalk Synthetic heterotic group of maize

Отцовские формы Paternal forms	Группа спелости по ФАО / FAO maturity group	Stiff Stalk Synthetic			
		OL 3104	OL 273	A 679	OL 563
1213-12	400-449			71,01	
1213-12	450-500				71,23
1217-9	450-500				70,74
1219-5	450-500				71,07
OL 199	200-299	70,23			
OL 389	200-299	70,22			
OL 502	450-500				70,75
OL 573-1	450-500				70,69
Кр 0685	450-500				70,87
Кр 0703	400-449			70,02	
Кр 0703	450-500				71,34
MP 232	200-299	70,8			
MP 321	200-299	71,1			
MP 321	300-399		71,48		
MP 333	200-299	71,49			
MP 356	200-299	70,53			
MP 3816	200-299	70,32			
MP 3816	300-399		71,51		
MP 3817	450-500				70,82
MP 3819	450-500				70,74
MP 389	200-299	70,25			
MP 407	450-500				70,79
MP 408	400-449			70,4	
MP 408	450-500				71,2
MP 424	450-500				71,18
MP 453	400-449			70,53	
MP 453	450-500				70,8
MP 455	450-500				71,27
MP 457	450-500				70,35

Таблица 3. Окончание

Table 3. The end

Отцовские формы Paternal forms	Группа спелости по ФАО / FAO maturity group	Stiff Stalk Synthetic			
		OL 3104	OL 273	A 679	OL 563
MP 481	400–449			70,77	
MP 481	450–500				70,26
MP 501	450–500				71,26
MP 502	450–500				70,69
MP 504	400–449			70,73	
MP 552	450–500				70,16
Хат 102	400–449			70,81	
Хат 102	450–500				70,39
Хат 112	450–500				70,76
Хат-4035	450–500				70,54
Всего комбинаций		8	2	7	22
X _{cp} по тестеру		70,61	71,49	70,61	70,81

Гибридные комбинации с тестерами из гетерозисной группы Iowa Dent представлены 15 гибридами, превысившими пороговое значение выборки. Варьирование значений содержания крахмала в зерне находилось в пределах от 70,09 до 71,95% СВ. Одно из самых высоких значений извлечения нативного крахмала показала комбинация двух родственных линий 1217-9 и 1219-5 с одним тестером OL 409. В этих комбинациях было извлечено по 71,95% СВ нативного крахмала, что является самым большим показателем среди всей выборки лучших 68 гибридов. Распределение по группам спелости гибридов с высоким (71% и выше) содержанием нативного крахмала показало принадлежность трех гибридов к группе ФАО 400–449 с варьированием содержания крахмала в зерне в пределах 71,38–71,95% СВ.

В результате проведенного ранжирования гибридных комбинаций по реакции на гетерозисные группы можно выделить отдельные отцовские формы, способствующие самому высокому (71–72%) накоплению нативного крахмала в зерне.

1. Stiff Stalk Synthetic – 12 линий:

MP 501, MP 455, MP 408, MP 424, Кр 0703, 1219-5, 1213-12 с OL563;

MP 3816, MP 321 с OL273; MP 333, MP 321 с OL3104; 1213-12 с А679;

2. Lancaster – 2 линии:

MP 385 с ДК 66 и К-Л-47 с L 5300 Lancaster

3. Iowa Dent – 3 линии:

1217-9, 1219-5, MP 506 с OL 409 Iowa Dent

Из 12 материнских форм наилучшие результаты по накоплению нативного крахмала показали 7 тестеров, из которых:

1. OL563, OL273, OL3104, А679 в группе Stiff Stalk Synthetic;

2. ДК 66, L 5300 в группе Lancaster;

3. OL 409 в группе Iowa Dent.

Распределение количества гибридов с содержанием крахмала в зерне выше 69% по гетерозисным группам показало, что больше половины гибридов (57,35%) прихо-

дится на гибриды из гетерозисной группы Stiff Stalk Synthetic, а на долю гетерозисных групп Lancaster и Iowa Dent приходится 20,59% и 22,05% соответственно (рис. 3). Анализ среднего значения накопления крахмала в гибридах трех гетерозисных групп показал, что динамика имеет следующий вид: 70,87% СВ → 70,71% СВ → 70,61% СВ при переходе от гетерозисной группы Stiff Stalk Synthetic → Lancaster → Iowa Dent соответственно.

Анализ результатов полевого испытания гибридов на реакцию М- и С-типов ЦМС позволил выявить как закрепители и восстановители, так и промежуточные формы с неполным закреплением/восстановлением стерильности метелок (табл. 4, 5). Тест-кроссы на тестер с М-типом стерильности показали, что 17 гибридов из 33 оказались полными закрепителями и 6 гибридов – полными восстановителями стерильности. Остальные 16 гибридов отнесены к неполным закрепителям/восстановителям стерильности. По группам спелости ФАО гибриды распределились преимущественно в сторону позднеспелых, с ФАО выше 400. К среднеспелой отнесено 4 гибрида с ФАО 300–399 и один раннеспелый с ФАО 220.

Результаты тест-кроссов на тестеры с С-типом ЦМС показали, что 6 линий характеризовались полной закрепительной и 6 линий – полной восстановительной способностью. Неполных закрепителей/восстановителей стерильности среди тест-кроссов на С-тип ЦМС обнаружено не было. Следует отметить, что в качестве источника С-типа ЦМС выступил единственный тестер OL 563 С, поэтому все они относятся к позднеспелой группе ФАО 400–499 и лишь один отнесен к среднеспелой группе с ФАО 380.

Результаты ранжирования отцовских линий гибридов по реакции на ЦМС позволило выделить 17 линий полных закрепителей и 16 линий с неполным закреплением ЦМС М-типа, а также 8 линий полных восстановителей М-типа стерильности (рис. 4). По реакции на С-тип удалось выделить 6 закрепителей и 8 линий восстановителей, при полном отсутствии полувосстановителей и полужакопителей С-типа ЦМС.

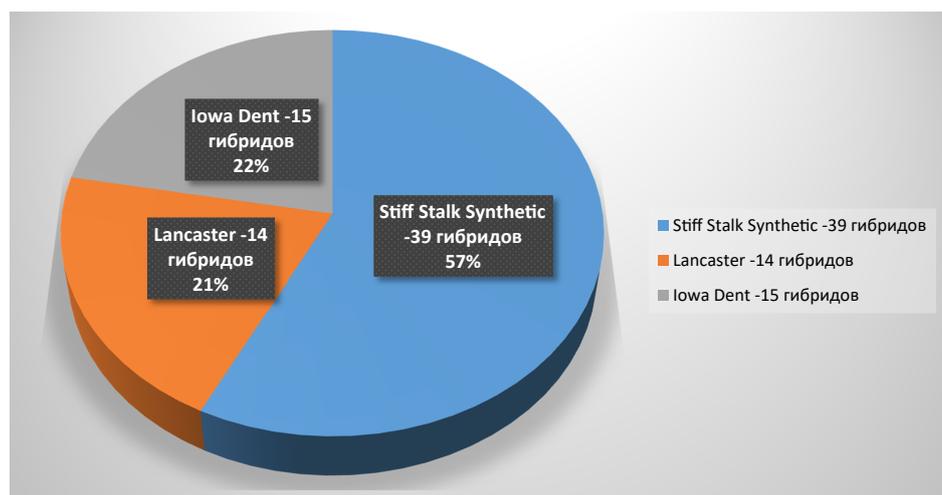


Рис. 3. Число гибридных комбинаций кукурузы с содержанием крахмала в зерне выше 69%, распределенных по гетерозисным группам тестеров

Fig. 3. The number of hybrid combinations of maize with grain starch content higher than 69%, and their distribution among heterotic groups of testers

Таблица 4. Ранжирование отцовских линий по реакции на М-тип ЦМС

Table 4. Ranking of the paternal lines according to their responses to CMS-S

Отцовские формы / Paternal forms	Группа спелости по ФАО / FAO maturity group	Реакция на ЦМС М-тип / Response to CMS-S	
		Закрепитель / Sterility maintainer	Восстановитель / Fertility restorer
OL 199	220	OL 3104 М	
Fr 1204	300	OL 3407 М OL 3104 М	
ИП 99	300	OL 273 М	
OL 389	380	OL 409 М	
OL 398	380	ГК 26 М*	А 679 М
OL 399	400	ГК 26 М*	
Кр 0703	430	ГК 26 М*	
1/164	450	ГК 26 М*	
Дк 534-1	450	А 679 М* OL 409 М*	ГК 26 М
OL 457	450		А 679 М
Кр 0685	480	OL 409 М ГК 26 М	
ХАТ-4043	480	А 679 М ГК 26 М	
Хат 102	480	А 679 М	
1213-12	480	OL 409 М* ГК 26 М*	
OL 573-1	480	А 679 М* ГК 26 М*	
ХАТ-4016	480	OL 409 М ГК 26 М	
ХАТ-4035	480	А 679 М ГК 26 М	

Таблица 4. Окончание

Table 4. The end

Отцовские формы / Paternal forms	Группа спелости по ФАО / FAO maturity group	Реакция на ЦМС М-тип / Response to CMS-S	
		Закрепитель / Sterility maintainer	Восстановитель / Fertility restorer
Хат 112	480	А 679 М* ГК 26 М*	
1217-9	480	ГК 26 М	А 679 М
ХАТ-4041	480	ОЛ 409 М* ГК 26 М*	
1/130-4-3	480	ГК 26 М	
1/122-3	480		ОЛ 409 М ГК 26 М
1219-5	480	ГК 26 М*	
ХАТ-3020	480	ГК 26 М*	
1218-2	480	ГК 26 М	
Всего комбинаций		33	6

Примечание: * – неполные закрепители стерильности

Note: * – incomplete sterility maintainers

Таблица 5. Ранжирование отцовских линий по реакции на С-тип ЦМС

Table 5. Ranking of the paternal lines according to their responses to CMS-C

Отцовские формы / Paternal forms	Группа спелости по ФАО / FAO maturity group	Реакция на ЦМС С-тип / Response to CMS-C	
		Закрепитель / Sterility maintainer	Восстановитель / Fertility restorer
ОЛ 398	380		ОЛ 563 С
1/73-10	400	ОЛ 563 С	
ОЛ 399	400		ОЛ 563 С
Кр 0703	430		ОЛ 563 С
Кр 0685	480		ОЛ 563 С
ХАТ-4043	480		ОЛ 563 С
1213-12	480		ОЛ 563 С
ОЛ 573-1	480		ОЛ 563 С
ХАТ-4016	480	ОЛ 563 С	
ХАТ-4035	480	ОЛ 563 С	
Хат 112	480	ОЛ 563 С	
1217-9	480		ОЛ 563 С
ХАТ-4041	480	ОЛ 563 С	
1/122-3	480	ОЛ 563 С	
Всего комбинаций		6	8

Примечание: * – неполные закрепители стерильности

Note: * – incomplete sterility maintainers

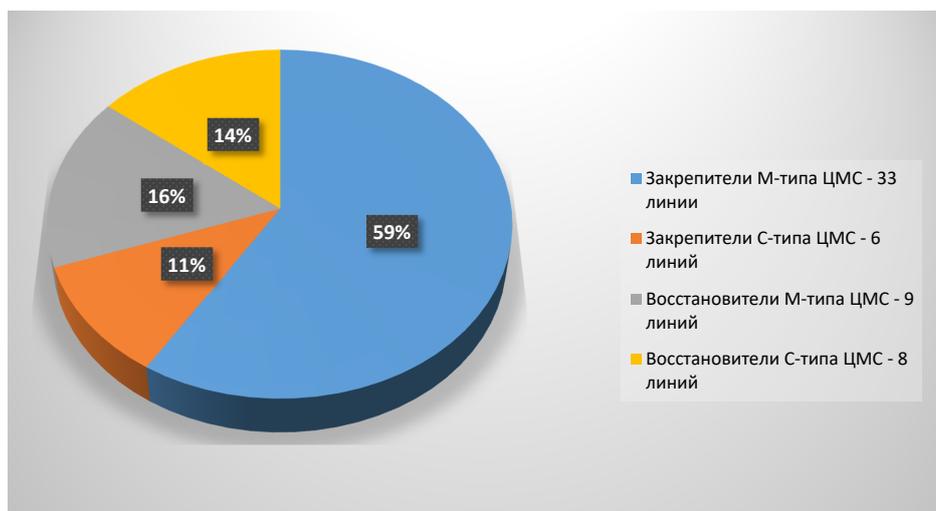


Рис. 4. Распределение инбредных линий по закрепительной и восстановительной реакции на М- и С-типы ЦМС в тест-кроссах

Fig. 4. Distribution of inbred lines according to their maintaining or restoring responses to CMS-S and CMS-C in test crosses

Обсуждение

Результаты селекции и последующих двухлетних испытаний 780 экспериментальных гибридов высококрахмалистой кукурузы в агроклиматических условиях степной зоны КБР показали варьирование урожайности зерна для разных групп спелости (ФАО 200–500) в среднем от 7 до 12 т/га. При этом изменчивость крахмала в зерне составляла от 58% до 72%. Выделены 22 гибридных комбинации, которые показали очень высокое (72–73%) содержание крахмала в зерне. Выделены пять гибридных комбинаций, которые характеризуются, наравне с высоким содержанием крахмала в зерне, относительно повышенным содержанием белка (12%) и масла (6%). Такие гибриды обладают повышенной рентабельностью при глубокой переработке зерна благодаря высокой доле побочной продукции в виде белка, кукурузного глютена и масла в виде кукурузных зародышей. Результаты полевых испытаний высококрахмалистых гибридов кукурузы показали повышенную устойчивость к полеганию при орошении в условиях степной зоны КБР (густота стояния растений – 62 тыс. раст./га) и дифференцированную скорость влагоотдачи зерна при созревании, а также различную устойчивость к широко распространенным в Северо-Кавказском федеральном округе болезням кукурузы (пузырчатая головня, фузариоз початка) на естественном инфекционном фоне. Гибридных комбинаций с выраженной устойчивостью к поражению вредителями (хлопковая совка, стеблевой мотылек) на естественном фоне выявлено не было. Ранжирование 71 отцовской линии позволит в дальнейшем прогнозировать гетерозис для подбора родительских пар гибридных комбинаций.

В результате многолетних селекционных исследований и двухлетних полевых испытаний создали 71 экспериментальный простой гибрид с высоким (не менее 70%) содержанием крахмала. Гибриды относятся к разным группам спелости по ФАО (200–500) и имеют потенциальную урожайность зерна от 7 до 12 т/га. Созданные гибриды могут служить сырьем для глубокой переработки зерна отечественными крахмальными заводами.

Заключение

В результате длительной селекции инбредных линий кукурузы на высокое содержание крахмала в зерне и их тестирования на гетерозис и реакцию на ЦМС М- и С-типов установлено, что экспериментальные гибриды характеризуются высоким потенциалом продуктивности как нативного крахмала, так и побочной продукции при глубокой переработке зерна. Фактическое извлечение крахмала из зерна у 68 гибридов из 780 находится в пределах 70–71,75% СВ, что свидетельствует о конкурентоспособности полученных комбинаций для импортозамещения гибридов зарубежной селекции. Созданы источники 23 стерильных материнских форм для селекции трехлинейных гибридов и 14 фертильных простых гибридов. Отцовские формы с неполным закреплением/восстановлением стерильности нуждаются в дальнейшей селекционной проработке (инбредированию) до получения стабильных полных закрепителей или восстановителей ЦМС. Ранжирование гибридов по принадлежности к трем гетерозисным группам не выявило какого-либо выраженного эффекта материнской плазмы на накопление крахмала в зерне, но показало незначительную специфичность некоторых тестеров по этому признаку. Наибольшее количество гибридов с высоким содержанием крахмала получено при гибридизации отцовских форм на стерильных тестерах принадлежащих к гетерозисной группе Stiff Stalk Synthetic, независимо от типа ЦМС.

References / Литература

- Abu-Ghannam N., Balboa E. Biotechnological, food, and health care applications. In: C.M. Galanakis (ed.). *Woodhead Sustainable Recovery and Reutilization of Cereal Processing By-Products: A volume in Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition*. Cambridge: Woodhead Publishing Inc.; 2018. p.253-278. DOI: 10.1016/B978-0-08-102162-0.00009-5
- Burrell M.M. Starch: the need for improved quality or quantity – an overview. *Journal of Experimental Botany*. 2003;54(382):451-456. DOI: 10.1093/jxb/erg049

- BusinesStat. Analysis of the starch market in Russia in 2017–2021, forecast for 2022–2026. Market prospects under sanctions (BusinesStat. Analiz rynka krakhmala v Rossii v 2017–2021 gg, prognoz na 2022–2026 gg. Perspektivy rynka v usloviyakh sanktsiy). BusinesStat; 2022. [in Russian] (BusinesStat. Анализ рынка крахмала в России в 2017–2021 гг, прогноз на 2022–2026 гг. Перспективы рынка в условиях санкций. BusinesStat; 2022). URL: <https://marketing.rbc.ru/research/27441/> [дата обращения: 01.08.2023].
- Dospekhov V.A. Methodology of field trial (with fundamentals of statistical processing of research results) (Metodika polevogo opyta [s osnovami statisticheskoy obrabotki rezultatov issledovaniy]). 6th ed. Moscow: Alyans; 2011. [in Russian] (Доспехов В.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 6-е изд. Москва: Альянс; 2011).
- Gabay-Laughnan S., Kuzmin E.V., Monroe J., Roark L., Newton K.J., Characterization of a novel thermosensitive restorer of fertility for cytoplasmic male sterility in maize. *Genetics*. 2009;182(1):91-103. DOI: 10.1534/genetics.108.099895
- Goldstein V.G., Nosovskaya L.P., Adikaeva L.V. About processing of by-products from corn grain into starch. *Innovatsionnye tekhnologii proizvodstva i khraneniya materialnykh tsennostey dlya gosudarstvennykh nuzhd = Innovative Technologies for the Production and Storage of Material Assets for National Needs*. 2015;4(4):46-52. [in Russian] (Гольдштейн В.Г., Носовская Л.П., Адикаева Л.В. О возможности переработки вторичных продуктов производства кукурузной крупы на крахмал. *Инновационные технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд*. 2015;4(4):46-52).
- Goldstein V., Lukin N., Radin O. By-products of starch-and-treacle production as feed components. *Compound Feeds*. 2018;7(8):54-56. [in Russian] (Гольдштейн В., Лукин Н., Радин О. Побочные продукты крахмалопаточного производства – кормовые компоненты. *Комбикорма*. 2018;7(8):54-56). DOI: 10.25741/2413-287X-2018-07-3-012
- GOST 10845-98. Interstate standard. Cereals and cereal milled products. Method for determination of starch. Official edition. Minsk: Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification; Moscow: Standartinform; 2009. [in Russian] (ГОСТ 10845-98. Межгосударственный стандарт. Зерно и продукты его переработки. Метод определения крахмала. Издание официальное. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации; Москва: Стандартинформ; 2009). URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/88/8817.pdf> [дата обращения: 01.08.2023].
- Guidelines for conducting field experiments with maize (Metodicheskiye rekomendatsii po provedeniyu polevykh opytov s kukuruzoy). Dnepropetrovsk: All-Union Research Institute of Maize; 1980. [in Russian] (Методические рекомендации по проведению полевых опытов с кукурузой. Днепропетровск: ВНИИ кукурузы; 1980).
- Hallauer A.R., Russell W.A., Lamkey K.R. Corn breeding. In: G.F. Sprague, J.W. Dudley (eds). *Corn and Corn Improvement. Agronomy Monographs. Volume 18*. 3rd ed. Madison, WI: American Society of Agronomy; Crop Science Society of America; Soil Science Society of America; 1988. p.463-564. DOI: 10.2134/agronmonogr18.3ed.c8
- Jaqueth J.S., Hou Z., Zheng P., Ren R., Nagel B.A., Cutter G. et al. Fertility restoration of maize CMS-C altered by a single amino acid substitution within the Rf4 bHLH transcription factor. *The Plant Journal*. 2020;101(1):101-111. DOI: 10.1111/tpj.14521
- Kamps T.L., Chase C.D. FLP mapping of the maize gametophytic restorer-of-fertility locus (*rf3*) and aberrant pollen transmission of the nonrestoring *rf3* allele. *Theoretical and Applied Genetics*. 1997;95:525-531. DOI: 10.1007/s001220050593
- Kaur B., Ariffin F., Bhat R., Karim A.A. Progress in starch modification in the last decade. *Food Hydrocolloids*. 2012;26(2):398-404. DOI:10.1016/j.foodhyd.2011.02.016
- Kim Y.J., Zhang D. Molecular control of male fertility for crop hybrid breeding. *Trends in Plant Science*. 2018;23(1):53-65. DOI: 10.1016/j.tplants.2017.10.001
- Kukekov V.G. (comp.). Broad unified COMECON list of descriptors and international COMECON list of descriptors for sp. *Zea mays* L. Leningrad: VIR; 1977. [in Russian] (Широкий унифицированный классификатор СЭВ и международный классификатор СЭВ видов *Zea mays* L. / сост. В.Г. Кукееков. Ленинград: ВИР; 1977).
- Laughnan J.R., Gabay S.J. Nuclear and cytoplasmic mutations to fertility in S male-sterile maize. In: Walden (ed.). *Maize Breeding and Genetics*. New York, NY: Wiley; 1978. p.427-447.
- Pajić Z., Radosavljević M., Filipović M., Todorović G., Srdić J., Pavlov M. Breeding of specialty maize for industrial purposes. *Genetika*. 2010;42(1):57-66. DOI: 10.2298/GENSR1001057P
- Pollak L.M., Scott M.P. Breeding for grain quality traits. *Maydica*. 2005;50(3):247-257.
- Shmaraev G.E., Matveeva G.V. Study and maintenance of the maize collection accessions. Guidelines (Izucheniye i podderzhaniye obraztsov kollektzii kukuruzy. Metodicheskiye ukazaniya). Leningrad: VIR; 1985. [in Russian] (Шмараев Г.Е., Матвеева Г.В. Изучение и поддержание образцов коллекции кукурузы. Методические указания. Ленинград: ВИР; 1985).
- Sinha A.K., Kumar V., Makkar H.P.S., De Boeck G., Becker K. Non-starch polysaccharides and their role in fish nutrition – A review. *Food Chemistry*. 2011;127(4):1409-1426. DOI: 10.1016/j.foodchem.2011.02.042
- Sisco P.H. Duplications complicate genetic mapping of *Rf4*, a restorer gene for cms-C cytoplasmic male sterility in corn. *Crop Science*. 1991;31(5):1263-1266. DOI: 10.2135/cropsci1991.0011183X003100050036x
- Somavat P., Liu W., Singh V. Wet milling characteristics of corn mutants using modified processes and improving starch yields from high amylose corn. *Food and Bio-products Processing*. 2021;126:104-112. DOI: 10.1016/j.fbp.2020.12.015
- Sotchenko V.S. Maize breeding, seed production, and cultivation technology (Selektsiya, semenovodstvo, tekhnologiya vozdelvaniya kukuruzy). Pyatigorsk; 2009. [in Russian] (Сотченко В.С. Селекция, семеноводство, технология возделывания кукурузы. Пятигорск; 2009).
- StatSoft Russia: [website]. [in Russian] (StatSoft Russia: [сайт]). URL: <https://1soft.space/en/statsoft-statistica/> [дата обращения: 11.07.2023].
- Tang J.H., Liu Z.H., Chen W.C., Hu Y.M., Ji H.Q., Ji L.Y. The SSR markers of the main restorer genes for cms-C cytoplasmic male sterility in maize. *Scientia Agricultura Sinica*. 2001;34:592-596.
- Tie S., Xia J., Qiu F., Zheng Y. Genome-wide analysis of maize cytoplasmic male sterility-S based on QTL mapping. *Plant Molecular Biology Reporter*. 2006;24:71-80. DOI: 10.1007/BF02914047
- Ullstrup A.J. The impacts of the southern corn leaf blight epi-

- demics of 1970–1971. *Annual Review of Phytopathology*. 1972;10:37-50. DOI: 10.1146/annurev.py.10.090172.000345
- Watson S.A. Description, development, structure, and composition of the corn kernel. In: P.J. White, L.A. Johnson (eds). *Corn Chemistry and Technology*. 2nd ed. St. Paul, MN: American Association of Cereal Chemists; 2003. p.69-106.
- Weider C., Stamp P., Christov N., Hüsken A., Foueillassar X., Camp K.H. et al. Stability of cytoplasmic male sterility in maize under different environmental conditions. *Crop Science*. 2009;49(1):77-84. DOI: 10.2135/cropsci2007.12.0694
- Zhang R., Ma S., Li L., Zhang M., Tian Sh., Wang D. et al. Comprehensive utilization of corn starch processing by-products: A review, *Grain and Oil Science and Technology*. 2021;4(3):89-107. DOI: 10.1016/j.gaost.2021.08.003
- Zhang Z.F., Wang Y., Zheng Y.L. AFLP and PCR-based markers linked to *Rf3*, a fertility restorer gene for S cytoplasmic male sterility in maize. *Molecular Genetics and Genomics*. 2006;276(2):162-169. DOI: 10.1007/s00438-006-0131-y
- Zheng H., Wang H., Yang H., Wu J, Shi B., Cai R. et al. Genetic diversity and molecular evolution of Chinese waxy maize germplasm. *PLoS One*. 2013;8(6):e66606. DOI: 10.1371/journal.pone.0066606

Информация об авторах

Милана Руслановна Фирсова, аспирант, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, milagonikova001@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6995-9015>

Беслан Рашадович Шوماхов, старший научный сотрудник, Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, Институт сельского хозяйства – филиал КБНЦ РАН, 360004 Россия, Нальчик, ул. Кирова, 224, shomaхов.beslan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9897-8434>

Рита Сарабиевна Кушхова, научный сотрудник, Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, Институт сельского хозяйства – филиал КБНЦ РАН, 360004 Россия, Нальчик, ул. Кирова, 224, kushkhova.r@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0006-8851-5819>

Зинаида Темирбиевна Хаширова, младший научный сотрудник, Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, Институт сельского хозяйства – филиал КБНЦ РАН, 360004 Россия, Нальчик, ул. Кирова, 224, khashirova.z@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-8843-3683>

Руслан Абузедович Кудаев, научный сотрудник, Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, Институт сельского хозяйства – филиал КБНЦ РАН, 360004 Россия, Нальчик, ул. Кирова, 224, boss_rusik@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-3901-856X>

Азамат Хасбиевич Гяургиев, младший научный сотрудник, Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, Институт сельского хозяйства – филиал КБНЦ РАН, 360004 Россия, Нальчик, ул. Кирова, 224, agyaurgiyev@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0008-4707-8557>

Сафар Пахауович Аппаев, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, Институт сельского хозяйства – филиал КБНЦ РАН, 360004 Россия, Нальчик, ул. Кирова, 224, appaev-safar@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9741-8646>

Алан Мухамедович Кагермазов, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник, Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, Институт сельского хозяйства – филиал КБНЦ РАН, 360004 Россия, Нальчик, ул. Кирова, 224, kagermazov.alan@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8639-050X>

Азамат Валерьевич Хачидогов, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник, Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, Институт сельского хозяйства – филиал КБНЦ РАН, 360004 Россия, Нальчик, ул. Кирова, 224, azamat.xa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5722-3163>

Асланбек Иссаевич Бузуртанов, научный сотрудник, Ингушский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, 386203 Россия, Республика Ингушетия, Сунжа, ул. Осканова, 50, buzurtanov.aslanbek@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3438-5987>

Кульсум Шоидовна Бадургова, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Ингушский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, 386203 Россия, Республика Ингушетия, Сунжа, ул. Осканова, 50, kulsum1977@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8203-2481>

Магомед Алаудинович Базгиев, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Ингушский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, 386203 Россия, Республика Ингушетия, Сунжа, ул. Осканова, 50, ishos06@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7529-6171>

Владимир Георгиевич Гольдштейн, кандидат технических наук, заведующий отделом, Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалосодержащего сырья крахмала и переработки крахмалосодержащего сырья – филиал ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха, 140051 Россия, Московская обл., Люберецкий р-н, пос. Красково, ул. Некрасова, 11, 6919486@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2042-0681>

Валентина Ивановна Хорева, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, horeva43@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2762-2777>

Эдуард Балилович Хатефов, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, haed1967@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5713-2328>

Information about the authors

Milana R. Firsova, Postgraduate Student, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, milagonikova001@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6995-9015>

Beslan R. Shomakhov, Senior Researcher, Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Agriculture – branch of the KBSC RAS, 224 Kirova St., Nalchik 360004, Russia, shomaxov.beslan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9897-8434>

Rita S. Kushkhova, Researcher, Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Agriculture – branch of the KBSC RAS, 224 Kirova St., Nalchik 360004, Russia, kushkhova.r@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0006-8851-5819>

Zinaida T. Khashirova, Associate Researcher, Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Agriculture – branch of the KBSC RAS, 224 Kirova St., Nalchik 360004, Russia, khashirova.z@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-8843-3683>

Ruslan A. Kudaev, Researcher, Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Agriculture – branch of the KBSC RAS, 224 Kirova St., Nalchik 360004, Russia, boss_rusik@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-3901-856X>

Azamat Kh. Gyaurgiev, Associate Researcher, Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Agriculture – branch of the KBSC RAS, 224 Kirova St., Nalchik 360004, Russia, agyaurgiyev@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0008-4707-8557>

Safar P. Appaev, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Agriculture – branch of the KBSC RAS, 224 Kirova St., Nalchik 360004, Russia, appaev-safar@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9741-8646>

Alan M. Kagermazov, Cand. Sci. (Agriculture), Researcher, Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Agriculture – branch of the KBSC RAS, 224 Kirova St., Nalchik 360004, Russia, kagermazov.alan@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8639-050X>

Azamat V. Khachidogov, Cand. Sci. (Agriculture), Researcher, Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Agriculture – branch of the KBSC RAS, 224 Kirova St., Nalchik 360004, Russia, azamat.xa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5722-3163>

Aslanbek I. Buzurtanov, Researcher, Ingush Scientific Research Institute of Agriculture, 50 Oskanova St., Sunzha 386203, Republic of Ingushetia, Russia, buzurtanov.aslanbek@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3438-5987>

Kulsum Sh. Badurgova, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Ingush Scientific Research Institute of Agriculture, 50 Oskanova St., Sunzha 386203, Republic of Ingushetia, Russia, kulsum1977@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8203-2481>

Magomed A. Bazgiev, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Ingush Scientific Research Institute of Agriculture, 50 Oskanova St., Sunzha 386203, Republic of Ingushetia, Russia, ishos06@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7529-6171>

Vladimir G. Goldshtein, Cand. Sci. (Engineering), Head of a Department, Russian Potato Research Center, All-Russian Research Institute of Starch and Starch-Containing Raw Materials Processing – branch of the Russian Potato Research Center, 11 Nekrasova St., Kraskovo Settlement, Lyuberetsky District, Moscow Province 140051, Russia, 6919486@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2042-0681>

Valentina I. Khoreva, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, horeva43@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2762-2777>

Eduard B. Khatefov, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, haed1967@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5713-2328>

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.08.2023; одобрена после рецензирования 04.03.2024; принята к публикации 04.09.2024. The article was submitted on 22.08.2023; approved after reviewing on 04.03.2024; accepted for publication on 04.09.2024.