

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья

УДК 636.086.15; 631.527 664.6/.7

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-018

Комплексная оценка хозяйственной ценности тетраплоидной белозерной пищевой кукурузы (*Zea mays* L.)М. Ю. Хакулова¹, С. П. Аппаев¹, И. А. Кегадуев², А. Ю. Паритов², А. И. Бузуртанов³, И. А. Кибкало⁴, Э. Б. Хатефов⁴¹ Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, Институт сельского хозяйства, Нальчик, Россия² Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия³ Ингушский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, Сунжа, Россия⁴ Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

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

Актуальность. Мировой рынок белозерной кукурузы к 2050 г. ожидает удвоенного роста, несмотря на ее низкую урожайность. Такая популярность объясняется возросшим спросом на безглютеновые продукты и развитием новых технологий пищевых продуктов из кукурузного зерна и муки. Селекция высокоурожайных гибридов белозерной кукурузы с улучшенными питательными свойствами актуальна.

Материалы и методы. Объектом исследования служили 238 образцов белозерной тетраплоидной кукурузы ранних поколений (S_2 – S_3). В качестве тестера (материнская форма) использовали белозерную тетраплоидную линию, созданную акад. В. К. Шумным (Институт цитологии и генетики СО РАН). Семенной материал размножали в степной зоне Северокавказского федерального округа. Биохимический состав зерна кукурузы определяли на ИК-анализаторе SupNir 2750 (Китай). Статистическую обработку данных выполнили с использованием программного обеспечения Statistica 10.0 от StatSoft Russia (2023).

Результаты. Создана коллекция из 61 линии S_6 -поколения инбридинга с повышенными питательными свойствами и улучшенными морфометрическими признаками. Получены 18 инбредных линий с белым зерном и белым стержнем початка, с повышенной белизной муки и крупы. Выделены 25 линий с повышенным содержанием белка (15–16%), 16 высокомасличных линий (4,5–5,0%) и 17 линий с высоким содержанием крахмала (73–74%), 2 линии с высокой специфической комбинационной способностью на тестер Шумного. Аминокислотный состав зеина в зерновке у тест-кроссов F_1 не выявил выдающихся гибридов, имеющих хозяйственную ценность по накоплению в зеине незаменимых аминокислот. Средняя урожайность 18 комбинаций составила $5,08 \pm 0,43$ т/га при варьировании признака $Cv = 34,86\%$, $HSP_{05} = 0,26$ т/га. Установлено, что тестер В. К. Шумного в гибридных комбинациях способствует полеганию растений и его дальнейшее использование нецелесообразно.

Заключение. Образцы тетраплоидной белозерной кукурузы характеризуются рядом хозяйственных признаков, имеющих ценность для гибридной селекции.

Ключевые слова: гибрид кукурузы, белая кукурузная мука, диплоид, тетраплоид, зеин, глютен

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».

Для цитирования: Хакулова М.Ю., Аппаев С.П., Кегадуев И.А., Паритов А.Ю., Бузуртанов А.И., Кибкало И.А., Хатефов Э.Б. Комплексная оценка хозяйственной ценности тетраплоидной белозерной пищевой кукурузы (*Zea mays* L.). *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(1):62-73. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-018

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o18

Comprehensive assessment of the economic value in tetraploid white-grained food maize (*Zea mays* L.)Milana Yu. Khakulova¹, Safar P. Appayev¹, Ivan A. Kegaduev², Anzor Yu. Paritov², Aslanbek I. Buzurtanov³, Iliya A. Kibkalo⁴, Eduard B. Khatefov⁴¹ Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Agriculture, Nalchik, Russia² Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia³ Ingush Scientific Research Institute of Agriculture, Sunzha, Russia⁴ N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia

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

Background. The global white maize market is expected to double by 2050, despite its low yield. This popularity is driven by increased demand for gluten-free products and the development of new food technologies for maize grain and flour. Breeding high-yielding white maize hybrids with improved nutritional properties is essential.

Materials and methods. The material of the study was 238 accessions of tetraploid white maize of early inbreeding (S2–S3). The tetraploid white-grained line developed by Acad. V. K. Shumny (Institute of Cytology and Genetics, SB RAS) was used as a tester (maternal form). Seed material was reproduced in the steppe zone of the North Caucasian Federal District. The biochemical composition of maize grain was assessed on an IR analyzer SupNir 2750 (China). Statistical data processing was performed using the Statistica 10.0 software from StatSoft Russia (2023).

Results. A collection was made of 61 S_6 inbred lines with enhanced nutritional properties and improved morphometric traits. Eighteen inbred lines with white grain and white cobs, with increased flour and groat whiteness, were obtained. Twenty-five high-protein lines (15–16%), 16 high-oil lines (4.5–5.0%), 17 high-starch lines (73–74%), and 2 lines with high specific combining ability with Shumny's tester were selected. The amino acid composition of zein in the caryopses of F_1 test crosses did not reveal outstanding hybrids with such economic value as the accumulation of essential amino acids in zein. The average yield of 18 combinations was 5.08 ± 0.43 t/ha with the trait variation $C_v = 34.86\%$, $LSD_{05} = 0.26$ t/ha. It was established that Shumny's tester in hybrid combinations enhanced plant lodging, so its further use is inappropriate.

Conclusion. The collection of tetraploid white maize manifested a number of agronomic traits valuable for hybrid breeding.

Keywords: maize hybrid, white maize flour, diploid, tetraploid, zein, gluten

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the state task according to VIR's theme plan of under Project No. FGEM-2022-0009 "Structuring and disclosing the potential of hereditary variation in the global collection of cereal and groat crops at VIR for the development of an optimized genebank and its sustainable utilization in plant breeding and crop production".

For citation: Khakulova M.Yu., Appaev S.P., Kegaduev I.A., Paritov A.Yu., Buzurtanov A.I., Kibkalo I.A., Khatefov E.B. Comprehensive assessment of the economic value in tetraploid white-grained food maize (*Zea mays* L.). *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(1):62-73. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o18

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Кукуруза (*Zea mays* L.), являясь одной из важных зерновых культур в мире, используется в качестве продовольствия, фуража и сырья для большого количества промышленных продуктов (Das et al., 2021; Lone et al., 2021). Зерно кукурузы, основываясь на цвете эндосперма, можно в целом разделить на два широко выращиваемых типа – желтую и белую. Белая кукуруза является основной продовольственной культурой в некоторых странах Африки (Кении, Малави, Танзании и Зимбабве), Центральной и Южной Америки (CIMMYT, FAO, 1997; Rubey et al., 1997). В Российской Федерации белую кукурузу используют в пищу в Северокавказском регионе (Kuzenko, 2022; Galgovskaya et al., 2024). Мировое производство белой кукурузы оценивается в 65–70 миллионов тонн в год, что составляет около 12–13% от всего производства кукурузы. Более 90% белой кукурузы выращивается в развивающихся странах, что составляет около четверти от общего объема производства кукурузы и почти две пятых посевных площадей кукурузы (<https://www.fao.org/4/w2698e/w2698e03.htm>; López-Pereira, Morris, 1994).

Мировая селекция отдает предпочтение желтозерной кукурузе из-за ее большей обеспеченности каротиноидами в сравнении с белозерной, у которой содержание каротиноидов минимально. Поэтому все источники белозерной кукурузы сосредоточены на семеноводстве сортов или гибридов, заложённых на низкоурожайных белозерных староместных сортах того или иного региона, в основном из-за вкусовых качеств зерна (Malvar et al., 2008; Mukri et al., 2018; Kumar et al., 2022). Желтая окраска образуется благодаря накоплению каротиноидов, таких как каротины и ксантофиллы. В кукурузном зерне основными каротиноидными пигментами являются бета-каротин, бетакриптоксантин, лютеин и зеаксантин (Mangelsdorf, Fraps, 1931). Белый цвет стержня початков, который является предпочтительным для сортов с белым эндоспермом зерновки, в основном регулируется рецессивным аллелем *P-ww* (который также может обозначаться как *p*) в локусе *P* (Coe et al., 1988). Гомозиготное состояние *P-ww* приводит к образованию бесцветных (белых) стержней початков. Аллель *P-ww* может быть представлен в двух формах: с коричневатым оттенком (*P-wwb*) или без него (*P-www*). Это различие обусловлено наличием ортодигидроксифлавонов, которые влияют на синтез флавонового гликозида майзина в рыльцах (шелковке). В случае наличия ортодигидроксифлавонов происходит синтез майзина, в то время как их отсутствие приводит к блокированию его синтеза (Styles, Ceska, 1977; Coe et al., 1988).

В США, являющихся мировым лидером по производству кукурузы, выращивание белозерной кукурузы составляет менее одного процента от общего объема внутреннего производства кукурузы, производимой в значительной степени в рамках контрактного земледелия из-за относительно ограниченного рынка. Урожайность лучших 27 гибридов белозерной кукурузы в среднем составила 8,59 т/га (гибрид Pioneer X1138AW до 10,00 т/га), у контроля желтозерного гибрида кукурузы Pioneer 3245 она достигала 9,58 т/га (Darrach et al., 1999).

Среди развивающихся стран производство белой кукурузы имеет первостепенное значение в Африке. В этом регионе производят около трети мирового урожая белой кукурузы, что составляет около 90% от общего регионального производства кукурузы (Byerlee, Heisey, 1997).

Наблюдающийся рост популярности белозерной кукурузы в последние годы можно объяснить развитием нутрицевтики и появлением новых знаний по сбалансированному питанию. Особый интерес к кукурузе проявляют диетологи из-за отсутствия в зерне кукурузы глютена.

В области селекции в этой связи скорректированы цели – все учреждения, занимающиеся селекцией кукурузы в США, создают белозерные гибриды. Среди них – Pioneer, Dekalb, Garst, Wilson, Vineyard, Asgrow, Zimmerman, IFSI, Agrigold, LG Seeds, NK и Whisnand (названия даны в сокращении без указания компании-владельца). В период до 2050 г. спрос на белозерную кукурузу в развивающихся странах ожидает удвоенного роста производства и потребления (Rosegrant, the IMPACT Development Team, 2008). Благодаря работе селекционеров США и Европы, современные белозерные гибриды обеспечивают урожайность на уровне 90–95% от обычных желтозерных. Около 80% белого кукурузного зерна, которое используется в США, идет на производство таких продуктов, как тортильи, чипсы-тортильи, кукурузные чипсы и лепешки тако. Остальные 20% – это традиционные крупы и мука разных видов. Еще одно специфическое применение белозерной кукурузы – откорм свиней, бройлеров и гусей для получения нежного и белого мяса, которого трудно достичь при кормлении кукурузой с желтым зерном. Такой продукт в основном покупают в Европе. Экспорт белой кукурузы остается важным источником дохода для многих зарубежных и российских фермеров и семеноводческих компаний. Мексика уверенно движется к достижению самообеспеченности белой кукурузой к 2025 г., при этом прогнозируется, что ее предложение в стране превысит 2 млн тонн (<https://www.tridge.com/news/mexico-to-reach-white-corn-self-sufficiency--czohfb>).

Исследования, направленные на генетическое улучшение зародышевой плазмы белой кукурузы для селекции гибридов с целью удовлетворения потребности населения, предпочитающего белую кукурузу в качестве пищи, актуальны. В связи с этим целью исследования было создание исходного селекционного материала белозерной пищевой кукурузы с улучшенными питательными свойствами.

Материалы и методы

Селекционные исследования образцов кукурузы проводили в период с 2021 по 2024 г. в предгорной зоне на территории селекционного участка Кабардино-Балкарского научного центра РАН. В качестве исходного материала использовали 238 образцов белозерной тетраплоидной кукурузы ранних инцухтов (S_2-S_3) среднепоздней группы спелости (ФАО 450). В качестве тестера (материнская форма) использовали белозерную тетраплоидную раннеспелую линию (ФАО 250), созданную акад. В. К. Шумным (Институт цитологии и генетики СО РАН). В качестве стандарта использовали два сорта диплоидной ($2n = 20$) белозерной пищевой кукурузы 'Кабардинская Белая Зубовидная' (КБЗ) и 'Местная Белая Кремнистая' (МБК), используемые для производства кукурузной муки и крупы в пищевой промышленности в РФ. Стандарты относились к той же среднепоздней группе спелости (ФАО 450) по классификации ФАО (от 100 до 900), что и испытанные тетраплоидные линии. Диплоидные стандарты были подобраны к тетраплоидным линиям и гибридам из-за отсутствия в мировой и отечественной селекционной практике сортов и гибридов белозер-

ной тетраплоидной кукурузы. Тетраплоидная инбредная линия – тестер Шумного (2n = 40) – не могла служить стандартом из-за того, что относится к другой группе спелости по классификации ФАО, но может служить тестером для гибридных комбинаций.

Для совмещения сроков цветения родительских форм тестер Шумного высевали на 12–15 дней позже отцовских форм, во второй срок. Фенологические наблюдения и учет урожая зерна проводили по методике ВИР (Shmagaev, Matveeva, 1985). Описание биометрических показателей даны согласно широкому унифицированному классификатору СЭВ вида *Zea mays* L. (Kukekov, 1977). Уборочную влажность зерна определяли с помощью влагомера «ФАУНА-М». Биохимический состав зерна кукурузы

од приходится 75,8% (416 мм) (<https://ru.weatherspark.com>).

В течение четырех лет исследования посев проводился в оптимальные сроки с 1 по 12 мая на одном селекционном участке с трехпольным севооборотом: горох, пшеница и кукуруза. Первые всходы кукурузы появлялись на 7–10-й день после посева, а полные всходы – на 10–12-й день. Климатические условия роста и развития посевов кукурузы характеризовались недостатком естественных осадков, повышенными среднесуточными температурами и высокой солнечной инсоляцией в период цветения и налива зерна. Несмотря на эти условия агроклиматические факторы в целом способствовали получению урожая зерна (табл. 1).

Таблица 1. Количество осадков за сезон 2021–2024 гг., мм
(по данным метеопункта «Нальчик», Кабардино-Балкарская республика)
Table 1. Precipitation amount for the growing seasons in 2021–2024, mm
(according to Nalchik Weather Station, Kabardino-Balkarian Republic)

Месяцы	Годы				Среднего- летние значения
	2021	2022	2023	2024	
Май	78,1	64	28,8	43,8	53,6
Июнь	177	66,6	155,4	15,0	103,5
Июль	51,7	17,6	112	2,7	46,0
Август	27,2	13,6	17,4	28,9	21,7
Сентябрь	12,1	27,7	27,1	10,0	26,6
Сумма	612,0	369,3	534,3	270,0	251,4

зы определяли на ИК-анализаторе SupNir 2750 (Китай). Химический анализ зерна проводили в двукратной повторности. Размножение и гибридизацию осуществляли под пергаменными изоляторами. Статистическая обработка данных была выполнена с использованием программного обеспечения Statistica 10.0 от StatSoft Russia (2023).

Селекционный участок расположен на водоразделе рек Урвань – Нальчик (43°30'29" с. ш., 43°42'11" в. д.) Кабардино-Балкарской республики. Почвенный покров участка представлен лугово-черноземными почвами. Содержание гумуса в пахотном слое составляет 4,2%, реакция почвы по всему почвенному профилю среднещелочная (Рн = 8,1). Емкость поглощения в пахотном слое средняя (32 мг/экв. на 100 г почвы), с глубиной уменьшается постепенно. Содержание карбонатов в пахотном слое среднее (6,7%), глубже – высокое (13,6–14,7%). Обеспеченность почв подвижным фосфором очень низкая (0,4 мг/100 г почвы), а обменным калием – очень высокая (8 г/100 г).

Климат зоны умеренно жаркий. Сумма активных температур – 3000–3200°C. Увлажнение умеренное (коэффициент увлажнения – 0,5–0,9), гидротермический коэффициент равен 0,9–1,2. В среднем в конце второй декады апреля прекращаются заморозки, и среднесуточная температура воздуха переходит через отметку +10°C. Безморозный период составляет 190 дней. Он продолжается до конца октября. В конце июня – начале июля преобладают юго-восточные ветры, часто суховейные. За год отмечается до 17,5 дней с сильным ветром. Сумма осадков за год составляет 615 мм, из них на вегетационный пери-

од приходится 75,8% (416 мм) (<https://ru.weatherspark.com>).

Схема посева опытных образцов – 70 × 35 см, широко-рядная, площадь делянки – 4,9 м², повторности – четырехкратная для линий и трехкратная при испытании гибридов. Агротехнические мероприятия проводили в соответствии с методическими рекомендациями по проведению полевых опытов с кукурузой (Sotchenko, 2009).

Результаты и обсуждение

Исследования морфометрических признаков растений и початка, окраски зерна и его биохимического состава показали, что исходные линии ранних инцухтов S₂–S₃ были очень разнородными и не всегда соответствовали типичной белозерной кукурузе с белым зерном и белым стержнем (табл. 2).

В течение нескольких циклов самоопыления и позитивного отбора типичных белозерных образцов с белым стержнем початка удалось выделить 61 линию S₆₋₇-инбредности, которая имела не только белый стержень и зерно, но также характеризовалась повышенной питательной ценностью по основным биохимическим показателям (белок, крахмал, масло). По итогам фенотипической оценки эти образцы характеризовались высокой урожайностью зерна и массой 1000 зерен, устойчивостью к основным возбудителям грибных болезней и полеганию (табл. 3).

Произведенную выборку 18 гибридов, определенных как лучшие по структурным элементам початка, крупности зерна и другим показателям в тест-кроссах с тестером Шумного, скрестили с тестером Шумного, где тетраплоидные линии использовались в качестве отцовских

Таблица 2. Динамика инбридинга и объема выборки линий тетраплоидной белозерной кукурузы по годам исследований**Table 2.** Dynamics of inbreeding and the sample size of tetraploid white maize lines by years of research

Параметры Parameters	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.
Инбредность	S_2-S_3	S_3-S_4	S_4-S_5	S_5-S_6
Число изученных образцов	238	300	268	234
Число выделенных образцов	300	268	234	61*
Число выбракованных желтозерных образцов	16	34	20	7

Примечание: 61* – число образцов с белым зерном и белым стержнем початка

Note: 61* – number of accessions with white grain and white cobs

Таблица 3. Морфометрические признаки растений у тетраплоидных линий белозерной кукурузы (2021–2024 гг., Нальчик)**Table 3.** Morphometric plant characters in tetraploid white maize lines (2021–2024, Nalchik)

Признаки	Значения за годы исследований						
	2021	2022	2023	2024*	$\bar{X}_{cp} \pm S_x$	$C_v, \%$	HCP_{05}
Длина початка, см	11,05	10,00	12,25	12,07	$11,34 \pm 1,02$	9,16	1,53
Диаметр початка, см	3,61	3,56	3,47	3,43	$3,52 \pm 0,18$	2,34	0,03
Число рядов зерен на початке	11,04	10,71	15,69	14,4	$12,71 \pm 3,36$	19,04	1,38
Число зерен в ряду на початке, шт.	13,49	13,16	13,81	13,5	$13,49 \pm 0,01$	1,97	2,08
Масса 1000 зерен, г	398,15	391,03	405,09	396,8	$397,47 \pm 1,23$	1,45	25,98
Содержание белка, %СВ	11,48	10,45	11,50	11,89	$11,33 \pm 0,41$	5,44	0,21
Содержание крахмала, %СВ	71,86	72,24	71,17	70,77	$71,51 \pm 1,09$	0,93	0,75
Содержание масла, %СВ	3,51	3,38	3,56	3,71	$3,54 \pm 0,2$	3,85	0,31

Примечание: * – в 2024 г. проведен позитивный отбор образцов с белым зерном и белым стержнем початка

Note: * – in 2024, positive selection of accessions with white grain and white cobs was carried out

форм, а тестер – материнской. Результаты анализа морфометрических признаков показали, что гибридные комбинации тестер Шумного × 99-7112-2-3, тестер Шумного × 75-7055-3-1, тестер Шумного × 88-7101-2-2 превзошли урожайность зерна диплоидных стандартов в среднем за два года (табл. 4). Анализ данных по урожайности был не репрезентативным, поскольку использованный в опыте тестер Шумного характеризовался 100-процентным полеганием и передавал это проявление признака всем гибридным комбинациям, в которые он был включен. Гибридные комбинации тестер Шумного × 22-7023-1 и тестер Шумного × 97-7112-2-1 характеризовались меньшей уборочной влажностью зерна (33,8–33,9%), чем диплоидные стандарты (34,4–35,9%). Высокими значениями выше диплоидных стандартов по признаку «масса 1000 зерен» отличались гибриды: тестер Шумного × 97-7112-2-1, тестер Шумного × 99-7112-2-3, тестер Шумного × 101-7112-25, тестер Шумного × 120-7133-1, тестер Шумного × 113-7126-2-1, превысившие оба диплоидных стандарта по массе 1000 зерен на 1–15 г.

Полученные простые гибриды анализировали по хозяйственно ценным признакам и биохимическому составу зерна (табл. 5, 6). Но результаты биохимического анализа были интересны и позволили выявить высокие значения у одного гибрида (тестер Шумного × 101-7112-

25) по содержанию клетчатки (3,0%), одного гибрида (тестер Шумного × 78-7055-2-2) по содержанию масла (4,03%), одного гибрида (тестер Шумного × 98-7112-2-2) по содержанию белка (15,63%) и одного гибрида (96-7112-1-3) по высокому содержанию крахмала (71,7%).

В таблице 6 приведены результаты анализа зеина гибридов между линиями тетраплоидной белозерной кукурузы и тестером Шумного по девяти незаменимым аминокислотам: аргинин (Arg), цистеин (Cys), лейцин (Leu), изолейцин (Ile), лизин (Lys), метионин (Met), треонин (Thr), триптофан (Trp) и валин (Val). Эти аминокислоты играют важную роль в биологических процессах, включая синтез белков и метаболизм животных и человека. По результатам анализа аминокислотного состава не удалось обнаружить значимых отличий между гибридами по аминокислотному составу, что объясняется высокой инбредностью тетраплоидного генома родительских линий, который не перекрывается эффектом гетерозиса на уровне простых (двухлинейных) скрещиваний тест-кроссов (см. табл. 4).

Початки двух лучших по урожайности гибридов белозерной тетраплоидной кукурузы тестер Шумного × 75-7055-3-1 (8,0 т/га) и тестер Шумного × 88-7101-2-2 (7,8 т/га) характеризовались выровненностью по цвету зерна и стержня початка, крупным зерном и хорошей озерненностью (выполненностью) початка (рисунок).

Таблица 4. Морфометрические признаки F_1 тест-кроссов тетраплоидной белой зерной кукурузы, характеризующихся повышенными питательными свойствами (2022–2023 гг., Нальчик)

Table 4. Morphometric characters in F_1 test crosses of tetraploid white maize characterized by improved nutritional properties (2022–2023, Nalchik)

Гибриды	Урожай сделанки в пересчете на т/га	Уборочная влажность зерна, %	Вес 1000 зерен, г	Полегание, %	Поражение грибными болезнями (естественный фон), %		
					пузырчатая головня	фузариоз початка	пыльная головня
'Кабардинская Белая Зубовидная'	5,45	35,9	407	6,5	0,2	0,1	0
'Местная Белая Кремнистая'	6,3	34,45	369,5	4,1	0	0,1	0
тестер Шумного (тШ)**	1,95	22,5	254	100	0,3	6,8	0
тШ × 13-7023-1-3	3,5	37,2	388	0,2	0	0	0
тШ × 22-7023-1	4,1	33,9	361	0,3	0,6	0	0,1
тШ × 4-7006-1-1	6,2	38,3	405	0	0	0	0
тШ × 100-7112-2-4	2,2	35,1	386	3,3	0	0,1	0
тШ × 97-7112-2-1	4,8	33,8	410	0,5	0,2	0	0
тШ × 98-7112-2-2	3,1	36,5	395	0	0,2	0	0
тШ × 99-7112-2-3	7,3	38,8	408	1,8	0	0	0
тШ × 101-7112-2-5	3,6	36,9	414	0,2	0	0	0
тШ × 120-7133-1	2,9	38,0	420	0	0,5	0	0
тШ × 77-7093-2-1	5,5	35,7	403	1,8	0	0,1	0
тШ × 78-7055-2-2	5,8	34,9	394	0	0	0	0,1
тШ × 75-7055-3-1	8,0	36,2	368	0	1,2	0	0
тШ × 81-7100-1-1	3,3	37,7	382	2,2	0	0,1	0
тШ × 125-7135-3-1	4,5	38,1	396	0	0,3	0	0
тШ × 114-7126-2-2	6,1	36,6	385	0,2	0	0,2	0
тШ × 96-7112-1-3	6,4	37,4	405	2,7	0,2	0,2	0
тШ × 88-7101-2-2	7,8	38,0	390	0,5	0,2	0	0
тШ × 113-7126-2-1	6,3	37,5	417	0	0	0	0
$M \pm m$	$5,00 \pm 0,43$	$35,87 \pm 0,36$	$388,4 \pm 3,91$	$5,92 \pm 0,26$	$0,18 \pm 0,08$	$0,03 \pm 0,02$	$0,01 \pm 0,01$
$C_v, \%$	34,86	4,08	4,07	141,73	165,32	179,43	291,04
σ	1,6	1,5	16,3	1,08	0,31	0,07	0,03
$HSP_{05} =$	0,26	–	0,59	–	–	–	–

Примечание: * – сорта-стандарты; ** – тестер

Note: * – reference cultivars; ** – tester

Таблица 5. Результаты химического анализа зерна F₁ тест-кроссов, 2023–2024 гг.**Table 5. Results of the chemical analysis of grain in F₁ test crosses, 2023–2024**

Гибриды	Содержание, % сухого вещества			
	Клетчатка	Масло	Белок	Крахмал
‘Кабардинская Белая Зубовидная’*	2,75	3,91	11,93	69,07
‘Местная Белая Кремнистая’*	2,75	3,97	10,39	69,21
тестер Шумного (тШ)**	2,85	3,47	12,19	68,59
тШ × 13-7023-1-3	2,98	3,53	11,65	68,62
тШ × 22-7023-1	2,82	3,81	13,9	65,07
тШ × 4-7006-1-1	2,69	3,79	13,61	65,16
тШ × 100-7112-2-4	2,96	3,37	13,42	67,02
тШ × 97-7112-2-1	2,68	3,71	13,1	66,44
тШ × 98-7112-2-2	2,69	3,48	15,63	62,9
тШ × 99-7112-2-3	2,89	3,74	14,19	64,46
тШ × 101-7112-25	3,0	3,04	9,45	69,89
тШ × 120-7133-1	2,8	3,19	9,34	69,49
тШ × 77-7093-2-1	2,53	3,7	12,9	66,83
тШ × 78-7055-2-2	2,63	4,03	14,49	65,54
тШ × 75-7055-3-1	2,63	3,6	12,84	64,83
тШ × 81-7100-1-1	2,57	3,38	13,06	63,7
тШ × 125-7135-3-1	2,77	3,73	12,98	66,23
тШ × 114-7126-2-2	2,85	3,89	8,97	70,61
тШ × 96-7112-1-3	3,04	3,7	9,86	71,7
тШ × 88-7101-2-2	2,79	3,33	13,65	66,56
тШ × 113-7126-2-1	2,78	3,04	14,39	64,69
X _{ср} признака за 2023 г.	2,72 ± 0,21	3,54 ± 0,24	12,73 ± 1,68	66,85 ± 2,44
X _{ср} признака за 2024 г.	2,78 ± 0,15	3,55 ± 0,28	12,63 ± 1,96	66,65 ± 2,48
Парный t-критерий Стьюдента	1.53	0.65	0.673	1.550
P	0,144	0,520	0,510	0,139
HCP ₀₅ =	0,08	012	0,31	0,43

Примечание: * – сорта-стандарты; ** – тестер. Значения парного критерия оценивали между 2023 и 2024 г. Поскольку $t_{набл} < t_{крит}$, то изменения признака с 2023 по 2024 г. статистически не значимы

Note: * – reference cultivars; ** – tester. The values of the paired criterion were assessed between 2023 and 2024. Since $t_{obs} < t_{crit}$, the changes in the character from 2023 to 2024 were not statistically significant

Таблица 6. Аминокислотный состав зеина в зерне тест-кроссов F₁ (2023–2024 гг.)
Table 6. Amino acid composition of zein in the grain of F₁ test crosses (2023–2024)

Гибриды	Содержание аминокислот, %								
	Arg	Cys	Leu	Lle	Lys	Met	Thr	Try	Val
‘Кабардинская Белая Зубовидная*’	2,56	0,68	2,21	1,35	2,08	0,45	1,38	0,52	1,60
‘Местная Белая Кремнистая*’	2,55	0,68	2,11	1,31	2,01	0,52	1,41	0,52	1,58
тестер Шумного (тШ)**	2,61	0,69	2,24	1,37	2,10	0,47	1,39	0,53	1,65
тШ × 13-7023-1-3	2,51	0,67	1,99	1,24	1,9	0,57	1,43	0,52	1,53
тШ × 22-7023-1	2,58	0,68	2,22	1,36	2,1	0,43	1,37	0,53	1,62
тШ × 4-7006-1-1	2,62	0,7	2,2	1,36	2,09	0,5	1,42	0,54	1,64
тШ × 100-7112-2-4	2,54	0,68	2,05	1,28	1,96	0,55	1,46	0,53	1,56
тШ × 97-7112-2-1	2,57	0,68	2,18	1,34	2,07	0,45	1,37	0,53	1,61
тШ × 98-7112-2-2	2,61	0,68	2,23	1,36	2,08	0,46	1,40	0,54	1,63
тШ × 99-7112-2-3	2,54	0,66	2,19	1,33	2,05	0,38	1,3	0,52	1,58
тШ × 101-7112-2-5	2,41	0,64	1,93	1,19	1,82	0,48	1,32	0,49	1,46
тШ × 120-7133-1	2,42	0,65	1,91	1,19	1,84	0,5	1,35	0,50	1,47
тШ × 77-7093-2-1	2,55	0,68	2,12	1,31	2,02	0,48	1,39	0,53	1,57
тШ × 78-7055-2-2	2,65	0,71	2,28	1,41	2,18	0,47	1,43	0,55	1,68
тШ × 75-7055-3-1	2,52	0,66	2,07	1,27	1,95	0,49	1,37	0,52	1,55
тШ × 81-7100-1-1	2,47	0,65	2,01	1,24	1,88	0,51	1,38	0,51	1,51

Таблица 6. окончание
Table 6. The end

Гибриды	Содержание аминокислот, %								
	Arg	Cys	Leu	Lle	Lys	Met	Thr	Try	Val
тШ × 125-7135-3-1	2,59	0,69	2,21	1,36	2,10	0,43	1,37	0,54	1,63
тШ × 114-7126-2-2	2,45	0,65	2,05	1,26	1,95	0,43	1,31	0,5	1,52
тШ × 96-7112-1-3	2,55	0,69	2,08	1,29	2,01	0,50	1,37	0,53	1,57
тШ × 88-7101-2-2	2,60	0,69	2,08	1,30	1,97	0,59	1,46	0,54	1,59
тШ × 113-7126-2-1	2,53	0,66	1,90	1,20	1,77	0,69	1,48	0,52	1,49
X _{ср} признака за 2023 г.	2,51 ± 0,36	0,67 ± 0,04	2,02 ± 0,23	1,27 ± 0,08	2,01 ± 0,34	0,51 ± 0,08	1,40 ± 0,08	0,57 ± 0,05	1,63 ± 0,11
X _{ср} признака за 2024 г.	2,54 ± 0,06	0,64 ± 0,01	2,09 ± 0,11	1,29 ± 0,06	1,98 ± 0,11	0,49 ± 0,07	1,38 ± 0,05	0,52 ± 0,01	1,56 ± 0,06
Парный t-критерий Стьюдента	0,37	-0,14	1,88	0,99	-0,41	-1,77	-1,20	-4,39	-3,14
p	0,710	0,891	0,077	0,335	0,683	0,094	0,243	0,000	0,006
HCP ₀₅ =	0,01	0,01	0,03	0,02	0,04	0,02	0,01	0,01	0,02

Примечание: * – сорта-стандарты; ** – тестер. Значения парного критерия оценивали между 2023 и 2024 г. Поскольку $t_{набл} < t_{крит}$, то изменения признака с 2023 по 2024 г. статистически не значимы
Note: * – reference cultivars; ** – tester. The values of the paired criterion were assessed between 2023 and 2024. Since $t_{obs} < t_{crit}$, the changes in the character from 2023 to 2024 were not statistically significant



Рисунок. Лучшие гибридные комбинации, выделенные по биохимическому составу зерна: тестер Шумного × 75-7055-3-1 (слева) и тестер Шумного × 88-7101-2-2 (справа), 2023 г.

Figure. The best hybrid combinations identified according to the biochemical composition of their grain: Shumny's tester × 120-7133-1 (left), and Shumny's tester × 98-7112-2-2 (right), 2023

Закключение

Впервые в отечественной и мировой практике получены и испытаны гибриды белозерной пищевой тетраплоидной кукурузы. По результатам комплексной оценки хозяйственной ценности белозерной пищевой тетраплоидной кукурузы создана коллекция 61 линии S_6 -инбредности с повышенными питательными свойствами и улучшенными морфометрическими признаками. Получены 8 инбредных линий с белым зерном и белым стержнем, характеризующихся повышенной белизной муки и крупы. На основе результатов химического анализа зерна выделены линии с повышенным содержанием клетчатки (3,0–3,4%): линии 96-7112-1-3 и 101-7112-2-5; белка (15,63%): линия 98-7112-2-2; масла (4,03%): линия 78-7055-2-2; крахмала (70,6–71,7%): линии 114-7126-2-2 и 96-7112-1-3. Аминокислотный состав белка у тест-кроссов F_1 не выявил выдающихся гибридов, имеющих хозяйственную ценность по накоплению в зее не заменимых аминокислот. Получены 18 тест-кроссов в паре с тетраплоидным тестером кремнистой белозерной кукурузы (тестер Шумного) с урожайностью зерна в пределах от 2,2 до 8,0 т/га при $HCP_{0.5} = 0,26$ т/га. Определены лучшие гибридные комбинации с высокой урожайностью и питательной ценностью зерна: тестер Шумного × 75-7055-3-1 (8,0 т/га) и тестер Шумного × 88-7101-2-2. Установлено, что тестер Шумного во всех тест-кроссах способствует повышению полегаетости растений при созревании и его дальнейшее коммерческое использование в гибридных комбинациях невозможно. Исследования по улучшению устойчивости к полеганию гибридов тетраплоидной белозерной кукурузы и их родительских компонентов будут продолжены.

References / Литература

- Byerlee D., Heisey P.W. Evolution of the African maize economy. In: D. Byerlee, C.K. Eicher (eds). *Africa's Emerging Maize Revolution*. Boulder, CO: Lynne Rienner Publishers; 1997. p.9-12.
- CIMMYT, FAO of the United Nations. White maize: a traditional food grain in developing countries. FAO: Rome; 1997. Available from: <https://www.fao.org/4/w2698e/w2698e00.htm#Contents> [accessed Sept. 10, 2025].
- Coe E.H., Neuffer M.G., Hoisington D.A. The genetics of corn. In: G.F. Sprague, J.W. Dudley (eds). *Corn and Corn Improvement*. 3rd ed. Madison, WI: American Society of Agronomy; 1988. p.81-258.
- Correns C. Bastarde zwischen Maisrassen mit besondere Berücksichtigung der Xenien. *Nature*. 1901;65:126. [in German] DOI: 10.1038/065126d0
- Darrah L.L., West D.R., Lundquist R.L., Hibbard B.E., Schaafsma A., Lee E.A., Mbuvi S., Poneleit C.G., Betran J., Xu W. White food corn: 2000 performance test. Missouri State Special Report No. 535. Columbia, MO: University of Missouri; 2000. Available from: <https://www.ars.usda.gov/research/publications/publication/?seqNo115=118870> [accessed Sept. 10, 2025].
- Das A.K., Choudhary M., Kumar P., Karjagi C.G., Yathish K.R., Kuma R. et al. Heterosis in genomic era: advances in the molecular understanding and techniques for rapid exploitation. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2021;40(3):218-242. DOI: 10.1080/07352689.2021.1923185
- FAO. White Maize: a Traditional Food Grain in Developing Countries. III. Production: [website]. Available from: <https://www.fao.org/4/w2698e/w2698e03.htm> [accessed Sept. 10, 2025].

- Galgovskaya L.A., Terkina O.V., Romanova A.N. Analysis of the chemical composition of grain of white grain corn hybrids bred by the Federal State Budgetary Institution All-Russian Research Institute of Corn. *News of the Kabardin-Balkar Scientific Center of RAS*. 2024;26(2):64-71. [in Russian] (Галговская Л.А., Теркина О.В., Романова А.Н. Анализ химического состава зерна белозерных гибридов кукурузы селекции ФГБНУ ВНИИ кукурузы. *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2024;26(2):64-71). DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-2-64-71
- 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. Кукеков. Ленинград: ВИР; 1977).
- Kumar S., Das A.K., Naliath R., Kumar R., Karjagi C.G., Sekhar J.C. et al. Potential use of random and linked SSR markers in establishing the true heterotic pattern in maize (*Zea mays*). *Crop and Pasture Science*. 2022;73(12):1345-1353. DOI: 10.1071/CP21376
- Kuzenko M.V. White-grain Adygheiskaya corn – keeping traditions. *New technologies*. 2022;18(1):122-128. [in Russian] (Кузенко М.В. Кукуруза белозерная Адыгейская – сохраняя традиции. *Новые технологии*. 2022;18(1):122-128). DOI: 10.47370/2072-0920-2022-18-1-122-128
- Lone A.A., Dar Z.A., Gull A., Gazal A., Naseer S., Khan M.H., et al. Breeding maize for food and nutritional security In: A.K. Goyal (ed.). *Cereal Grains. Vol. 1*. London: IntechOpen; 2021. p.39-54. DOI: 10.5772/intechopen.98741
- López-Pereira M.A., Morris M.L. Impacts of international maize breeding research in the developing world, 1966–1990. Mexico: CIMMYT; 1994.
- Malvar R.A., Revilla P., Moreno-González J., Butrón A., Sotelo J., Ordás A. White maize: genetics of quality and agronomic performance. *Crop Science*. 2008;48(4):1373-1381. DOI: 10.2135/cropsci2007.10.0583
- Mangelsdorf P.C., Fraps G.S. A direct quantitative relationship between vitamin A in corn and the number of genes for yellow pigmentation, *Science*. 1931;73(1887):241-242. DOI: 10.1126/science.73.1887.241-b
- Mukri G., Kumar R., Rajendran A., Kumar B., Hooda K.S., Karjagi C.G. et al. Strategic selection of white maize inbred lines for tropical adaptation and their utilization in developing stable, medium to long duration maize hybrids. *Maydica*. 2018;63(2):1-8.
- Rosegrant M.W.; the IMPACT Development Team. International Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade (IMPACT): model description. Washington, DC: International Food Policy Research Institute; 2008.
- Rubey L., Ward R., Tschirley D. Maize research priorities: the role of consumer preferences. In: D. Byerlee, C.K. Eicher (eds). *Africa's Emerging Maize Revolution*. Boulder, CO: Lynne Rienner Publishers; 1997. p.145-156.
- 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).
- Sotchenko V.S. Prospects of maize cultivation for high-energy feed production (Perspektivy vozdevlyvaniya kukuruzy dlya proizvodstva vysokoenergeticheskikh kormov). In: *Breeding. Seed production. Maize cultivation technology (Selektsiya. Semenovodstvo. Tekhnologiya vozdevlyvaniya kukuruzy): proceedings of the Scientific and Practical Conference dedicated to the 20th anniversary of the All-Russian Maize Research Institute*. Pyatigorsk: Kavkazskaya Zdravnitsa; 2009. p.12-16. [in Russian] (Сотченко В.С. Перспективы возделывания кукурузы для производства высокоэнергетических кормов. В кн.: *Селекция. Семеноводство. Технология возделывания кукурузы: материалы научно-практической конференции, посвященной 20-летию ГНУ ВНИИ кукурузы*. Пятигорск: Кавказская здравница; 2009. С.12-16).
- Styles E.D., Ceska O. The genetic control of flavonoid synthesis in maize. *Canadian Journal of Genetics and Cytology*. 1977;19(2):289-302. DOI: 10.1139/g77-032
- TRIDGE. Mexico to Achieve White Corn Self-Sufficiency in 2025: [website]. Available from: <https://www.tridge.com/news/mexico-to-reach-white-corn-self-sufficiency-czohfb> [accessed Sept. 10, 2025].
- Weather Spark. All-year-round weather anywhere on Earth (Pogoda krugly god v lyuboy tochke Zemli): [website]. [in Russian] (Weather Spark. Погода круглый год в любой точке Земли: [сайт]). URL: <https://ru.weatherspark.com> [дата обращения: 15.09.2025].

Информация об авторах

Милана Юрьевна Хакулова, аспирант, лаборант-исследователь, Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, Институт сельского хозяйства – филиал КБНЦ РАН, 360004 Россия, Нальчик, ул. Кирова, 224, khakulova98mil@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4001-820X>

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>

Инал Арсенович Кегадуев, аспирант, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, 360004 Россия, Нальчик, ул. Чернышевского, 173, inalkegaduev@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0009-6149-5952>

Анзор Юрьевич Паритов, кандидат биологических наук, доцент, заведующий кафедрой, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, 360004 Нальчик, ул. Чернышевского, 173, paritov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5680-4978>

Асланбек Исмаевич 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>

Илья Анатольевич Кибкало, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, kibk@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8870-121X>

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. Большая Морская, 42, 44, head1967@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5713-2328>

Information about the authors

Milana Yu. Khakulova, Postgraduate Student, Laboratory Research Assistant, Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Agriculture – branch of the KBSC RAS, 224 Kirova St., Nalchik 360004, Russia, khakulova98mil@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4001-820X>

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>

Inal A. Kegaduev, Postgraduate Student, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, 173 Chernyshevskogo St., Nalchik 360004, Russia, inalkegaduev@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0009-6149-5952>

Anzor Yu. Paritov, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Head of a Department, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, 173 Chernyshevskogo St., Nalchik 360004, Russia, paritov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5680-4978>

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>

Iliya A. Kibkalo, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, kibk@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8870-121X>

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, head1967@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 25.07.2025; одобрена после рецензирования 08.12.2025; принята к публикации 02.02.2026.
The article was submitted on 25.07.2025; approved after reviewing on 08.12.2025; accepted for publication on 02.02.2026.