

УДК 633.15:631.524.6

СОЗДАНИЕ И ОЦЕНКА НОВЫХ ИСТОЧНИКОВ АМИЛОПЕКТИНОВОГО КРАХМАЛА НА ОСНОВЕ ЛИНИЙ ВОСКОВИДНОЙ КУКУРУЗЫ (ZEA MAYS CERATINA) ИЗ КОЛЛЕКЦИИ ВИР

¹Хатефов Э.Б., ²Аппаев С.П., ²Коцева А.Р.

¹ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Всероссийский научно-исследовательский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова», Санкт-Петербург, e-mail: haed1967@rambler.ru;

²Институт сельского хозяйства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр» Кабардино-Балкарский научный центр Российской Академии наук», Нальчик, e-mail: kbniish2007@yandex.ru

Сырьевые источники крахмала в России обеспечены на 80% зерном кукурузы. Крахмал кукурузы на 75–80% состоит из амилопектина и на 20–25% из амилозы. Амилопектин имеет разветвленную молекулу полимерной цепи, амилоза имеет линейную структуру. Гомозиготное состояние аллелей генов *wx* у восковидной кукурузы обеспечивает накопление в зерновке только амилопектина. В эндосперме восковидной кукурузы содержание амилопектина достигает 100%. В коллекции ВИР имеется около 100 образцов восковидной кукурузы с желтым и красным зерном, которые были включены в гибридизацию по диаллельной схеме. К сожалению, генетический полиморфизм этих линий недостаточно широк, и все они восходят своей родословной к источникам из стран Юго-Восточной Азии. Несмотря на близость происхождения, некоторые экспериментальные гибриды показали высокий полиморфизм количественных и качественных признаков. В результате анализа данных значений урожая зерна, сбора крахмала с 1 га, содержания амилопектина, протеина и жира выделены перспективные высокоурожайные гибридные комбинации со 100% содержанием амилопектина в зерне. Часть гибридов сочетают в себе высокий урожай зерна и высокое содержание в зерне жира и протеина. Эти гибридные комбинации характеризуются высокой рентабельностью за счет получения побочной продукции с высокой питательной ценностью при переработке зерна на крахмал. Внедрение в производство экспериментальных гибридов восковидной кукурузы обеспечит отечественные крахмальные предприятия дешевым сырьем для производства амилопектина и существенно ускорит процесс импортозамещения дорогостоящего амилопектина.

Ключевые слова: кукуруза, крахмал, амилопектин, амилоза, протеин, жир, ген *wx*, ген *ae*, общая и специфическая комбинационная способность, урожай зерна

SOURCES OF AMYLOPECTIN STARCH CREATED BASED ON LINES FROM THE COLLECTION OF CORN VIR

¹Khatefov E.B., ²Appaev S.P., ²Kotseva A.R.

¹Federal Research Center, N.I. Vavilov Research Institute of Plant Industry, St. Petersburg, e-mail: haed1967@rambler.ru;

²Institute of Agriculture – branch of the Federal Research Center «Federal Research Center» Kabardino-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Nalchik, e-mail: kbniish2007@yandex.ru

Raw materials sources of starch in Russia are provided with 80% corn grain. The peculiarity of corn starch is that it consists of amylopectin by 75–80% and amylose by 20–25%. Amylopectin has a branched polymer chain molecule, while amylose has a linear structure. The homozygous state of the *wx* gene alleles in waxy maize ensures only amylopectin accumulates in the weevil. In the endosperm of waxy maize, the content of amylopectin reaches 100%. In the VIR collection there are about 100 samples of waxy maize with yellow and red grains, which were included in the diallel hybridization. Unfortunately, the genetic polymorphism of these lines is not wide enough and they all go back to their sources from the countries of South-East Asia. Despite the proximity of origin, some experimental hybrids showed high polymorphism of quantitative and qualitative traits. As a result of data analysis of grain yield, starch collection from 1 g, amylopectin content, protein and oil, promising high-yielding hybrid combinations with a grain yield potential of 5–7t/ha and 100% amylopectin content in grain were identified. Some hybrid combinations are characterized by a combination of a high grain yield with a high content of oil and protein in the grain. These hybrid combinations are characterized by high profitability due to obtaining by-products with high nutritional value during the processing of grain for starch. The introduction into production of experimental hybrids of waxy maize will provide domestic starch enterprises with cheap raw materials for the production of amylopectin and significantly speed up the process of import substitution of expensive amylopectin.

Keywords: maize, starch, amylopectin, amylose, protein, oil, *wx* gene, *ae* gene, general and specific combining ability, grain yield

В мировом земледелии кукуруза занимает третье место и возделывается в основном как зерновая культура на нужды животноводства и продовольствия. Зерно кукурузы характеризуется высоким содержанием крахмала в зерне и может использоваться в том числе и как сырье для крахмальной промышленности. Так, с 2007 г.

более 50% всех продаж крахмала в мире приходилось на кукурузный крахмал, опережая продажи маниокового (тапиокового) крахмала, который занимает на мировом рынке чуть более 30% и картофельного крахмала, чья доля превышает 7% общемирового. В России производство крахмала в основном происходит за счет кукурузного зерна и составляет 80% [1–3]. При этом используются высокоурожайные гибриды кукурузы зубовидных или полузубовидных подвидов. Крахмал обычной кукурузы состоит примерно на 72% из амилопектина и на 28% из амилозы. Содержание амилозы контролируется рецессивными генами *ae*, а амилопектинового крахмала, который имеет разветвленную структуру полимерной цепи крахмала, генами *ix*. В генотипах кукурузы с гомозиготным состоянием генов *waхu* (*ixix*) при созревании зерновки формируется 100% амилопектина. Эта особенность восковидной кукурузы и характеризует ценность физико-химических качеств зерна и крахмала, а также то, что товаропроизводителям нет необходимости в проведении дополнительных технологических операций и финансовых затрат на разделение амилопектинового и амилозного крахмалов. Кроме того, гидролизированный оксигетилированный амилопектиновый крахмал, служит сырьем для получения противошокового крове-заменителя, предназначенного в качестве плазмозамещающего средства при травмах, ожогах, острой потере крови при операциях и в других случаях. Этот препарат может быть использован как плазмозаменитель в искусственной крови [4]. Мука из восковидной кукурузы используется в смесях для быстрого приготовления пудингов, производства клея и других промышленных продуктов, для которых требуется крахмал с разветвленной цепью. Амилопектиновый крахмал превосходит по своим качествам обычные крахмалы. Особенностью амилопектинового крахмала являются чистота и прозрачность клейстера, высокая вязкость и устойчивость при хранении. Он входит в состав пищевых продуктов, детского и лечебного питания, в качестве отличного загустителя и стабилизатора.

Отметим, что в настоящее время зерно восковидной кукурузы завозится из-за рубежа, поскольку отечественная селекция не создает гибридов восковидной кукурузы. В Государственном Реестре селекционных достижений, допущенных к использованию в 2017 г., нет отечественных

гибридов, которые могли бы обеспечить крахмальные заводы России высококачественным сырьем для производства амилопектина. Более того, генофонд восковидной кукурузы РФ, хранящийся в коллекции ВИР, насчитывает незначительное количество (около 100 образцов) восковидной кукурузы, которые представлены лишь местными сортами, полученными из стран Юго-Восточной Азии еще в середине прошлого столетия [5]. Зерно восковидной кукурузы чаще всего уступает по размеру зерну обычной кукурузы и гибриды и сорта менее урожайны, но по качеству и стоимости крахмала – значительно опережает их. В связи с вышеизложенным создание отечественных высокоурожайных гибридов восковидной кукурузы с повышенным содержанием амилопектинового крахмала в зерне актуально и является практически не разработанным, новым направлением отечественной селекции.

Цель исследований: оценка селекционной ценности линий восковидной кукурузы из коллекции ВИР в гибридных комбинациях для определения их ресурсного потенциала в производстве амилопектина.

Материалы и методы исследования

В качестве исходного материала для исследований служили 11 линий восковидной кукурузы коллекции ВИР, гомозиготных по гену *ix*. Агротехника заключалась в проведении осенней обработки почвы в виде лущения стерни озимой пшеницы в двух направлениях, внесения удобрений ($N_{170}P_{170}K_{120}$ кг д.в. на 1 га), вспашки на глубину 25–27 см с последующим ее дискованием. Весной до всходов кукурузы внесен почвенный гербицид Мерлин в дозе 0,13 кг/га. Посев проводили вручную с шириной междурядий 0,7 м. Густоту стояния формировали в фазе 4–5 листьев из расчета 60 тыс. раст/га. Гибридизацию проводили по диаллельной схеме. Полученные гибриды испытывали по типу контрольного питомника в трехкратной повторности на двухрядковых делянках площадью 7,84 м². Гибриды были разделены на блоки по 17–19 номеров. Внутри блоков номера размещали рендомизированно. В качестве стандарта был использован среднеспелый гибрид РИК 340 МВ (ФАО 350), который был наиболее близок по группе спелости к испытанным экспериментальным гибридам восковидной кукурузы.

Фенологические наблюдения, измерения и учеты проводили по Методическим

указаниям ВИР «Изучение и поддержание образцов коллекции кукурузы» [6]. Химические анализы проводились общепринятыми методами с использованием «Методических рекомендаций по оценке качества зерна» [7]. Изучение поражаемости растений вредителями и болезнями проводили на естественном фоне, без применения искусственного заражения. Дисперсионный анализ проведен по методике Б.А. Доспехова [8].

Результаты исследования и их обсуждение

Коллекция линий восковидной кукурузы ВИР насчитывает не более 100 образцов из которых были выделены 11 образцов гомозиготных по гену *wx* и характеризующихся высоким содержанием каротино-

идов белка и масла в зерне (рис. 1), эректоидным расположением листьев на стебле и склонностью к многопочатковости (рис. 2), высокой комбинационной способностью (рис. 3). В первую очередь для селекционера важно проводить тщательный подбор гибридов, гомозиготных по генам *wx*, возделывание этих гибридов и их родительских форм в условиях пространственной изоляции от источников доминантных генов *Wx*, а также включение в геном восковидной кукурузы источников высокого содержания белка и масла с учетом повышенного содержания в них незаменимых аминокислот и жирных кислот соответственно. В комплексе все эти компоненты влияют как на выход амилопектина, так и на качество побочной продукции в виде кормовых добавок [9].



Рис. 1. Поперечные срезы початков восковидной кукурузы с высоким содержанием белка, масла и каротиноидов в зерне



Рис. 2. Линии восковидной кукурузы с эректоидным расположением листьев на стебле и склонностью к многопочатковости



Рис. 3. Початки родительских линий восковидной кукурузы и их гибридов

Таблица 1

Значения урожая зерна и сбор крахмала в гибридах восковидной кукурузы, выделившихся по годам исследований, 2007–2009 гг.

№	Гибридная комбинация	Урожай зерна, т/га	Сбор амилопектина с урожаем зерна, т/га		Амилоза, (содержание) %
			фактически	прибавка	
1	РИК 340 МВ st	9,22	6,29	–	25,0
2	(90-4×90-1)	10,45	7,15	0,86	0,0
3	(90-4×90-6)	11,66	7,81	1,52	0,0
4	(90-5×9014)	10,40	7,12	0,83	0,0
5	(90-8×90-2)	11,11	7,31	1,02	0,0
6	(320×9019)	11,47	7,51	1,22	0,0
	НСР _{0,05}	0,78	0,41		

В результате изучения экспериментальных гибридов восковидной кукурузы были выделены 13 лучших комбинаций, которые превышали либо приближались по урожаю зерна и сбору крахмала с 1 га к соответствующим значениям у стандарта. При этом учитывалось и качество зерна по содержанию белка и масла. Значения урожая зерна 13 лучших гибридов, превысивших стандарт (9,22 т/га), позволили сделать выборку 5 гибридных комбинаций по признаку «сбор крахмала с урожаем зерна, т/га» (табл. 1), который варьирует от 7,12 до 7,81 т/га при его значении для стандарта 6,29 т/га. Варьирование отклонений от стандарта находится в пределах +0,83 до +1,52 т/га.

При производстве амилопектина из зерна обычной кукурузы разделение фракций двух крахмалов (амилопектина и амилозы) представляет собой достаточно трудоемкий

и энергозатратный процесс, за счет чего снижается рентабельность и повышается себестоимость готового продукта. В производстве амилопектина из зерна восковидной кукурузы эта технологическая деталь отсутствует вследствие ее 100% содержания в зерне [10], т.е. высокое содержание амилопектина в крахмале восковидной кукурузы является одним из главных ее преимуществ по сравнению с другими подвидами кукурузы. Основным условием для сохранения гомозиготности рецессивного гена *wx* и чистоты конечного является создание условий соблюдения пространственной изоляции посевов восковидной кукурузы от источников доминантных генов *Wx* в период цветения. Следует отметить, что существенным недостатком некоторых образцов коллекции восковидной кукурузы ВИР, который значительно снижает показатели

урожаю зерна в гибридах, является мелкосемянность. Многие гибридные комбинации, в геноме которых имеется сочетание генов их с генами высокого содержания лизина и триптофана (гены *fl2* и *o2*), при высоких значениях питательности и количества крахмала уступали стандартным значениям по урожаю зерна с 1 га из-за низкого значения веса 1000 зерен, поэтому они не вошли в выборку лучших гибридов. Такие зерновки отличались и повышенной восприимчивостью к фузариозу.

При производстве крахмала из зерна кукурузы важное экономическое значение имеет качество побочных продуктов в виде зародыша зерновки и воды после замачивания зерна. Основным показателем качества зародыша, как побочного продукта после выделения крахмала, является содержание в нем протеина и жира. Из побочной продукции производители крахмала извлекают дополнительную прибыль в виде кормовых добавок, поэтому высокая питательность зерна восковидной кукурузы имеет немаловажное значение. Анализ биохимического состава зерна экспериментальных гибридов восковидной кукурузы выявил три гибридные комбинации (9015×9011; 90-4×90-7; 320×90-7) которые показали высокое содержание масла и одну комбинацию (9015×9011) с высоким содержанием протеина в зерне (табл. 2).

Селекционная ценность изученных в опыте экспериментальных гибридных комбинаций восковидной кукурузы показала, что значение содержания протеина в зерне между 6 и 7% характерно для 30 гибридных комбинаций, тогда как значения сбора с 1 га – в пределах от 0,6 до 0,7 т/га для 25 гибридов. Значения содержания жира в зерне изученных гибридов варьировало между 5 и 6% и для 31 гибридной

комбинации. По сбору масла с 1 га было выделено 25 гибридных комбинаций, которые показали значения от 0,4 до 0,5 т/га. Эти значения показывают эффективность использования зерна восковидной кукурузы не только для получения амилопектина, но и побочной продукции в виде кукурузного протеина и жира.

Заключение

Результаты исследования экспериментальных гибридных комбинаций восковидной кукурузы, созданных на основе коллекции ВИР, показали ее селекционную ценность. Значение урожая зерна гибрида (90-4×90-1) составляло 10,45 т/га, при 100% содержании амилопектина в зерне, а максимальный сбор амилопектина 6,01 т/га показал гибрид (9015×9011). Для экспериментальных гибридов (9015×9011; 90-4×90-7; 320×90-7) характерны высокое содержание амилопектина и высокое содержание жира (5,8%) и протеина (8,3%) в зерне. Внедрение в производство гибридов с такими характеристиками позволит значительно повысить рентабельность производства крахмала за счет реализации побочной продукции. При этом снижается себестоимость сырья, используемого в крахмалопаточном производстве, что существенно снижает себестоимость конечной продукции. Решение проблемы источника сырья для производства амилопектина обеспечит производство ряда товаров в медицине, пищевой и химической промышленности, концентрированных кормов. Создание и внедрение в производство гибридов восковидной кукурузы с высоким содержанием протеина и жира в зерне, которые значительно превосходят по питательности и энергетической ценности другие источники кормов, позволит повысить рентабельность также и животноводства.

Таблица 2

Селекционная ценность гибридов восковидной кукурузы, выделившихся по биохимическому составу зерна за годы исследований, 2007–2009 гг.

№ п/п	Гибридная комбинация	Урожай зерна, т/га	Содержание в зерне					
			Крахмал		Протеин		Жир	
			%	т/га	%	т/га	%	т/га
1	РИК 340 MB st	9,22	68,2	6,29	7,7	0,71	5,29	0,49
2	(90-4×90-1)	10,45	68,4	7,15	6,8	0,71	5,15	0,54
3	(90-4×90-7)	9,62	68,1	6,55	6,2	0,60	5,80	0,56
4	(90-5×9014)	10,40	68,5	7,12	6,6	0,69	5,25	0,55
5	(9015×9011)	9,15	68,1	6,23	8,3	0,76	6,01	0,55
6	(320×90-7)	10,35	65,1	6,74	7,7	0,80	5,80	0,60
	HCP _{0,05}	1,2		0,7		0,05		0,11

Работа выполнена в рамках государственного задания ВИР (№ 0662-2018-0005, № 0662-2018-0010, № 0662-2018-0013).

Список литературы / References

1. Шорохов В.В. Селекция и хозяйственное использование восковидной кукурузы в Кабардино-Балкарии. Нальчик: Ч.П. Полиграфия, 2009. 92 с.
Shorokhov V.V. Selection and economic use of waxy maize in Kabardino-Balkaria. Nalchik: Ch.P. Polygraphy, 2009. 92 p. (in Russian).
2. Коптелова Е.К., Лукин Н.Д., Третьяков Ю.И. О крахмале из восковидной кукурузы // Пищевая промышленность. 2012. № 4. С. 56–58.
Koptelova E.K., Lukin N.D., Tretyakov Y.I. Starch Obtained from Waxy Corn // Food Industry. 2012. № 4. P. 56–58 (in Russian).
3. Жужукин В.И., Гудова Л.А. Интродукция восковидной и крахмалистой кукурузы в Нижнем Поволжье // Бюллетень Ботанического сада Саратовского государственного университета. 2009. № 8. С. 264–268.
Zuzukin V.I. Gudova L.A. Introduction waxy and starchy corn in the Lower Volga region // The Bulletin of the Botanical garden of the Saratov state University. 2009. № 8. P. 264–268 (in Russian).
4. Жушман А.И. Модифицированные крахмалы. М.: Пищепромиздат, 2007. 236 с.
Zhushman A.I. Modified starches. M.: Pishchepromizdat, 2007. 236 p. (in Russian).
5. Хатефов Э.Б., Шорохов В.В. Анализ химического состава зерна новых гибридов восковидной кукурузы селекции КБНИИСХ // Материалы научно-практической конференции, посвященной 20-летию ГНУ ВНИИ кукурузы. Под ред. акад. В.С. Согченко. ВНИИК. Пятигорск, 2009. С. 164–169.
Khatefov E.B., Shorokhov V.V. Analysis of the chemical composition of grain new hybrids of waxy maize breeding KBNIIH // Materials of the scientific and practical conference dedicated to the 20th anniversary of the GNU All-Russian Scientific Research Institute of Maize. Ed. Acad. V. Sochenko. VNIIC. Pyatigorsk, 2009. P. 164–169 (in Russian).
6. Методические указания ВИР «Изучение и поддержание образцов коллекции кукурузы». Ленинград, 1985. 48 с.
Methodological guidelines VIR «Study and maintenance of samples of the collection of corn». Leningrad, 1985. 48 p. (in Russian).
7. Методические рекомендации по оценке качества зерна. М.: Тип. ВАСХНИЛ, 1977. 171 с.
Methodological guidelines for assessing the quality of grain. M.: Type. VASHNIL, 1977. 171 p. (in Russian).
8. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
Armor B.A. Field experience. M.: Agropromizdat, 1985. 351 p. (in Russian).
9. Сарбашева А.И., Хатефов Э.Б., Шорохов В.В. Анализ химического состава зерна новых среднеспелых гибридов кукурузы // Генетика, селекция и технология возделывания кукурузы: Материалы международной научно-практической конференции «Золотое наследие академика ВАСХНИЛ М.И. Хаджинова». КНИИСХ им. П.П. Лукьяненко. КНИИСХ им. П.П. Лукьяненко. Краснодар, 2009. С. 65–71.
Sarbasheva A.I., Khatefov E.B., Shorokhov V.V. Analysis of the chemical composition of grain of new mid-ripening corn hybrids // Genetics, selection and technology of cultivation of corn: Proceedings of the international scientific-practical conference «Golden heritage of academician VASHNIL M.I. Hadzhinova. KNIICH them. P.P. Lukyanenko. KNIICH them. P.P. Lukyanenko. Krasnodar, 2009. P. 65–71 (in Russian).
10. Шорохов В.В. Морфобиологические признаки и селекционная ценность восковидной кукурузы в Кабардино-Балкарии: дис. ... канд. с/х. наук. Краснодар, 2011. 25 с.
Shorokhov V.V. Morphological characteristics and breeding value of waxy corn in Kabardino-Balkaria: dis. ... kand. sel'skhoz. nauk. Krasnodar, 2011. 25 p. (in Russian).