

ИНБРЕДНЫЕ ЛИНИИ И ГИБРИДЫ КУКУРУЗЫ (*Zea mays* L.) СЕРБСКОЙ СЕЛЕКЦИИ С ВЫСОКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ФОТОСИНТЕЗА, ОБОГАЩЕННЫМ ПИГМЕНТНЫМ СОСТАВОМ И ПОВЫШЕННОЙ ПИТАТЕЛЬНОЙ ЦЕННОСТЬЮ*

Ч. РАДЕНОВИЧ^{1, 2}, Н. ДЕЛИЧ¹, М. СЕЧАНСКИ¹, Ж. ЙОВАНОВИЧ¹,
Г. СТАНКОВИЧ¹, А. ПОПОВИЧ¹

Чтобы удовлетворить потребность в качественных продуктах для населения (прежде всего детей и пожилых людей), в кормах для домашних животных, а также в сырье, пригодном для промышленной переработки (производство полуфабрикатов и готовой продукции), необходимо отобрать инбредные линии кукурузы с функционально эффективным и обогащенным пигментным комплексом, с высокими пищевыми достоинствами. В настоящей работе мы изучили физиологические, биохимические, биофизические свойства у элитных инбредных линий кукурузы и их гибридов, специально оценив эффективность фотосинтеза, продуктивность и пригодность образцов для широкого использования, питательную ценность зерна и содержание в нем эссенциальных биоактивных веществ, в частности пигментов, проявляющих антиоксидантные свойства. В этой работе объектом изучения были высокоурожайные гибриды кукурузы (*Zea mays* L.) ZP 633, ZP 735 и ZP 737 и исходные инбредные линии ZPPL 146 и ZPPL 159 (линии и гибриды являются собственностью Maize Research Institute, Zemun Polje — Института кукурузы «Земун Поле», г. Белград, Сербия). Изученные линии и гибриды имеют габитус, соответствующий модели эффективного фотосинтеза (вертикально стоящие листья с углом наклона 1-3-го надпочаточных листьев примерно 15-20°). С помощью рамановской спектроскопии интактных листьев выявлены изменения в состоянии каротиноидов. На основании определения интенсивности замедленной флуоресценции хлорофилла в зависимости от температуры, критических температур фазовых переходов и энергии активации хлорофилла (экспериментальные данные и линеаризация в соответствии с критерием Аррениуса) образцы оценены как устойчивые в условиях повышенных температур и засухи, что подтверждено испытанием в полевых опытах на участках, расположенных в разных зонах как в Сербии, так и в других странах Юго-Восточной Европы. Анализ химического состава зерна у элитных инбредных линий выявил обогащенный пигментный комплекс. Так, у линий содержание желтых пигментов — 18-19 $\mu\text{g } \beta\text{CE/g d.m.}$, каротиноидов — 21-27 мг/кг, у гибридов — соответственно 31-33 $\mu\text{g } \beta\text{CE/g d.m.}$ и 27-32 мг/кг. Гибриды имеют продолжительный период вегетации, обладают stay-green фенотипом, проявляют высокую урожайность (60-80 т/га на силос и 7-12 т/га по зерну), устойчивость к полеганию, болезням и засухе. У них более чем на 10 % увеличена доля зародыша в зерне, что особенно важно для повышения его питательной ценности и качества продуктов переработки. Приведена полная характеристика основных селекционно ценных признаков у элитных инбредных линий ZPPL 146 и ZPPL 159 как родительских форм создаваемых гибридов с программируемыми свойствами.

Ключевые слова: линии кукурузы (*Zea mays* L.), гибриды, лист, зерно, тилакоидная мембрана, температурная зависимость, фотосинтетическая модель, замедленная флуоресценция хлорофилла, состав пигментов, нутриенты.

С 1954 года благодаря успехам в селекции и семеноводстве создано свыше 1400 гибридов кукурузы разного направления использования — на зерно, силос и для промышленной переработки (1-4). В этот период также были созданы условия для разработки современных технических средств и технологий для применения в селекции и производстве гибридных семян, удовлетворяющих потребностям рынка в товарной кукурузе (5-9). Разумеется, такое развитие было невозможно без проведения многочисленных системных фундаментальных исследований по различным научным дисциплинам и современным направлениям. Это биофизика, биохимия, биотехнологии, изучение фотосинтеза, молекулярная спектроскопия комбинационного рассеяния (спектроскопия, основанная на эффекте Рамана, — англ. Raman

* Работа проводилась при основной финансовой поддержке Института кукурузы «Земун Поле» и частично поддержана Министерством науки и технологического развития Сербии (проекты 03E211, 03E22, TR-20003, TR-20007, TR-20014, справочный номер 31028, 31037).

scattering spectroscopy), которая используется при неупругом рассеянии света, позволяет идентифицировать колебательные состояния молекул (фононы) и эффективна как аналитический инструмент, позволяющий выявлять изменения в состоянии молекулярных связей у химических веществ с аналогичной молекулярной структурой (10-16). Такой подход стал основой для решения не только стандартных (селекция на урожайность, пригодность для силосования и промышленной переработки), но и более тонких задач — создания элитных инбредных линий и гибридов кукурузы с улучшенным химическим составом по эссенциальным биогенным соединениям (17-22).

Для удовлетворения потребности в качественных продуктах для населения (прежде всего детей и пожилых людей), а также в кормах в промышленном сырье (получение полуфабрикатов и готовой продукции) необходимо было отобрать инбредные линии кукурузы с функционально эффективным и обогащенным пигментным комплексом, с высокими пищевыми достоинствами. На основе таких линий созданы высококачественные гибриды кукурузы, соответствующие требованиям к здоровому питанию, а также запросам кормопроизводства и перерабатывающей промышленности, и охарактеризованы их хозяйственно и селекционно ценные признаки.

Мы сравнили физиологические, биохимические, биофизические свойства элитных инбредных линий кукурузы и их гибридов, оценили эффективность фотосинтеза, продуктивность и пригодность для широкого использования, питательную ценность зерна и содержание эссенциальных биогенных веществ, в частности пигментов, проявляющих антиоксидантный эффект.

Методика. Объектом изучения были высокоурожайные гибриды кукурузы (*Zea mays* L.) ZP 633, ZP 735 и ZP 737 и исходные инбредные линии ZPPL 146 и ZPPL 159 (линии и гибриды — собственность Maize Research Institute, Zemun Polje, г. Белград, Сербия).

Для определения химического состава зерна у испытуемых инбредных линий и гибридов использовались стандартные общепринятые методы, которые более детально изложены в ряде работ (17, 22-26). Измерения резонансного рамановского спектра листьев у инбредных линий проводили в соответствии с процедурой, описанной в наших публикациях (27-30). В серии экспериментов по определению угла наклона вертикально стоящих верхних листьев и площади листовой поверхности у инбредных линий кукурузы с помощью специально сконструированного угломера измеряли угол между 1-м надпочаточным листом и стеблем. Площадь листовой поверхности определяли с помощью аппарата Portable area meter, model LI-3000 («LICOR Biosciences», США). Величину угла наклона и площадь листовой поверхности учитывали в течение 3 лет на 126 растениях для каждой инбредной линии. Подробнее процедура рассмотрена нами ранее (15, 26).

При оценке фотосинтетической активности, структурных и функциональных изменений в тилакоидной мембране хлоропластов изучали замедление флуоресценции хлорофилла (ЗФ) в зависимости от температуры, критические температуры фазовых переходов и энергию активации. Для этих исследований испытуемые линии выращивали на опытном поле Института кукурузы «Земун Поле». Косо срезанные на 1-м междоузлии растения перенесли в лабораторию с опытного поля в утренние часы (7⁰⁰-8⁰⁰). Срезанные растения погружали в воду до 2-го междоузлия. За 2 ч до измерения флуоресценции растения помещали под стеклянный черный колокол. У таких растений брали высечку из интактного листа над початком, а затем помещали ее в темную камеру (фосфороскоп). Высечку листа выдерживали в камере (в темноте) в течение 15 мин, после чего исследовали температурную зависимость ЗФ хлорофилла. Размер анализируемой выборки — 118 растений для каждой

инбредной линии. Для измерений использовали усовершенствованный неинвазивный флуоресцентный метод, разработанный в Институте кукурузы «Земун Поле». Аппаратура для измерения ЗФ хлорофилла описана детально (12-14, 26, 31-33). Конструктивные особенности приборов для регистрации индукционных сигналов при изучении температурной зависимости ЗФ хлорофилла, критических температур при фазовых переходах и энергии активации подробно обсуждаются в одной из наших работ (33). Эти приборы снабжены термисторами, встроенными в фосфороскоп, и регулятором температуры PRT 3000 («Sefram», Франция). С помощью регулятора температуру образца сохраняют постоянной или изменяют в диапазоне от 25 до 60 °С в заданном интервале времени, а термистор, соприкасающийся с поверхностью высежки листа, обеспечивает точное измерение температур.

Урожайность и технологическую пригодность при выращивании на зерно и силос учитывали в многолетних и многочисленных испытаниях в разных регионах Сербии и других стран Юго-Восточной Европы с применением стандартных технологий (17, 20, 34).

Для статистической оценки данных применяли программные средства.

Результаты. Эмпирические попытки осознать роль кукурузы в здоровом питании предпринимались еще два столетия назад, но лишь в середине XX века проблеме стали посвящать специальные исследования. Авторов настоящей работы эта тематика заинтересовала в начале 1990-х годов (35).

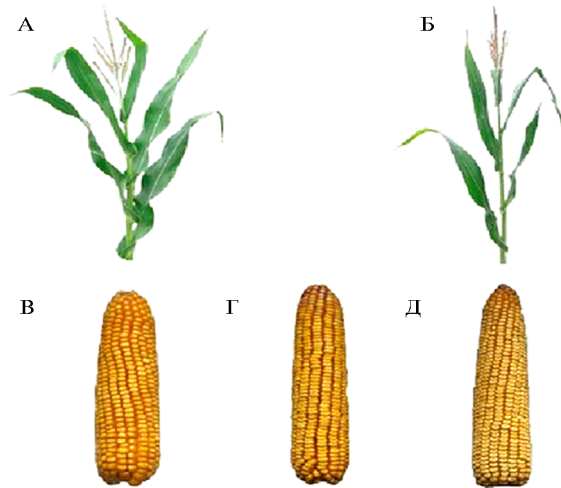


Рис. 1. Внешний вид элитных инбредных линий кукурузы (*Zea mays* L.) с вертикально стоящими верхними листьями ZPPL 146 (А), ZPPL 159 (Б) и початков полученных на их основе высококачественных гибридов ZP 633 (В), ZP 735 (Г) и ZP 737 (Д) сербской селекции.

Так как речь идет об элитных инбредных линиях кукурузы со специфическим химическим составом и о гибридах (рис. 1), предназначенных для целевого использования (продукты питания, корма, переработка), их свойствам и характеристикам в настоящей работе уделено особое внимание.

Отметим также, что комплексные исследования растений проводили с использованием как общепринятых стандартных процедур, так и авторских современных методик.

1. Результаты анализа химического состава зерна у элитных инбредных линий и гибридов кукурузы (*Zea mays* L.) сербской селекции (среднее за 3 года, опытное поле Института кукурузы «Zemun Polje», г. Белград, Сербия)

Показатель	Данные литературы (24)		Среднее в эксперименте				
	пределы	среднее	для линий		для гибридов		
			ZPPL 146	ZPPL 159	ZP 633	ZP 735	ZP 737
Влажность, %	7-23	16,0	10,24	10,12	9,90	9,84	10,15
Крахмал, %	61-78	71,7	67,80	66,26	68,23	64,39	67,86
Белки, %	6-12	9,5	10,22	12,57	11,11	12,27	11,57
Жиры (масло), %	1,0-5,7	4,3	7,53	5,38	6,11	5,82	7,16
Зола, %	1,1-3,9	1,4	1,48	1,45	1,51	1,54	1,47
Целлюлоза, %		3,0	2,26	2,33	2,37	2,43	2,00

Пентоза (рибоза и дезоксирибоза), %	5,8-6,6	6,2	—	—	—	—	—
Волокна, %	8,3-11,9	9,5	—	—	—	—	—
Целлюлоза + лигнин, %	3,3-4,3	3,3	—	—	—	—	—
Сумма сахаров (по глюкозе), %	1,0-3,0	2,6	—	—	—	—	—
Желтые пигменты, $\mu\text{g } \beta\text{CE/g d.m.}$	—	—	19,00	18,10	27,30	21,90	21,60
Сумма каротиноидов, мг/кг	12-36	26	33,2	31,8	32,4	28,3	27,8

Примечание. Для определения содержания желтых пигментов использовали метод ААСС (American Association of Cereal Chemists, USA), 1995. Pigment. Methods 14-50 (25). Прочерки означают, что остальные показатели слабо влияют на питательную ценность инбредных линий и гибридов кукурузы.

Анализ химического состава зерна испытуемых образцов (элитные инбредные линии кукурузы с вертикально стоящими верхними листьями ZPPL 146 и ZPPL 159 и гибриды ZP 633, ZP 735 и ZP 737) (табл. 1), наряду со стандартными показателями качества, включал определение содержания витаминов, диетических волокон и других биогенных соединений, роль которых обсуждается в связи с проблемой здорового питания (24, 25).

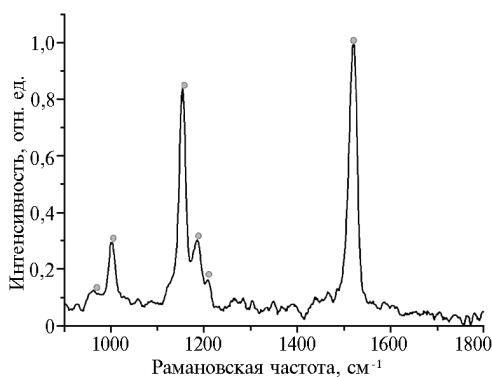


Рис. 2. Резонансный рамановский спектр листа у элитной инбредной линии кукурузы (*Zea mays* L.) ZPPL 146 сербской селекции.

Типичный резонансный рамановский спектр листа у инбредной линии кукурузы ZPPL 146 приведен на рисунке 2. В интервале рамановской частоты от 900-1800 cm^{-1} существует шесть характерных резонансных рамановских спектральных полос (на 962, 1026, 1160, 1187, 1206 и 1520 cm^{-1}). Четыре спектральные полосы более низкой интенсивности (I_{962} , I_{1026} , I_{1187} и I_{1206}) обусловлены конформационными изменениями фосфатов, гликогенов и амидов III (полоса, характеризующая C-N растяжение и NH-поворот). Две другие спектральные полосы (I_{1160} , I_{1520}) гораздо более высокой интенсивности регулярно выявляются при конформационных изменениях в молекулах каротиноидов. Обычно анализируются различия в интенсивности спектральных полос (I_{1520} и I_{1160}), но чаще оценивается их соотношение (I_{1520}/I_{1160}). В представленном резонансном рамановском спектре листа у инбредной линии ZPPL 146 (см. рис. 2) доминантные спектральные полосы (I_{1160} и I_{1520}) обусловлены молекулами каротиноидов, находящихся в неполярной фазе тилакоидной мембраны. Следует подчеркнуть эффективность резонансной Раман-спектроскопии при изучении состояния жизненно важных функций листа, в особенности информативности такого подхода для оценки состояния растений в атипичных агроэкологических условиях, например вне обычной зоны произрастания. Молекулы каротиноидов (β -каротин и С40Н56, имеющие активность витамина А, а также два ксантофилла — криптоксантин С40Н56О и зеаксантин С40Н56О₂), локализованные в неполярной фазе тилакоидной мембраны, могут служить очень хорошей естественной тест-системой, позволяющий регистрировать тончайшие изменения в этой мембране. В структуре молекул каротиноидов модификации могут проявиться в виде сгибания, растягивания, сжимания и физического разрыва химических связей, что обусловлено интенсивностью воздействия факторов

внешней среды (прежде всего, неблагоприятных температур). Каждое такое структурное изменение в молекуле каротиноида, безусловно, влияет не только на его функцию, но и на состояние и функцию тилакоидной мембраны в целом. Структурные изменения связей $-C=C-$ отражаются на спектральной полосе 1520 см^{-1} , тогда как $=C-C=$ — на спектральной полосе 1160 см^{-1} (см. рис. 2) (36).

Полученные результаты измерения величины угла между 1-м надпочаточным листом и стеблем (табл. 2) указывают на то, что изучаемые элитные инбредные линии кукурузы относятся к современной группе с вертикально расположенными верхними листьями и по морфологическим свойствам соответствуют модели растения с эффективным фотосинтезом.

2. Расположение и площадь поверхности 1-го надпочаточного листа у инбредных линий кукурузы (*Zea mays* L.) сербской селекции с эффективным фотосинтезом (среднее за 3 года, опытное поле Института кукурузы «Zemun Polje», г. Белград, Сербия)

Линия	Группа спелости (по ФАО)	Гетерозисное происхождение линии	Угол наклона к стеблю, °		Площадь, см ²	
			\bar{X}	σ	\bar{X}	σ
ZPPL 146	650-700	BSSS, USA, Zemun Polje	20,8	1,21	3762,7	238,00
ZPPL 159	550-600	Местная популяция из Аргентины (S13), скрещенная с линией PE25-10-1, Zemun Polje	21,3	1,23	2378,1	241,00

Примечание. Изученные элитные инбредные линии характеризуются высокой комбинационной способностью по урожайности зерна как родительские пары, хорошо репродуцируются, дают высокие урожаи. Линии богаты пигментами и обладают высокими пищевыми достоинствами (данные частично приведены далее, см. табл. 6).

Результат экспериментальных измерений замедленной флуоресценции хлорофилла $I_{3Ф}$ у изучаемых инбредных линий при изменении температуры в диапазоне от 25 до 60 °С приведены на рисунке 3 (А, Б).

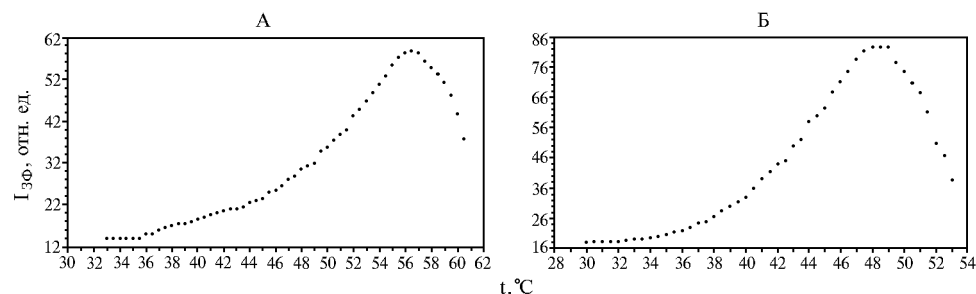


Рис. 3. Интенсивность замедленной флуоресценции хлорофилла ($I_{3Ф}$) в тилакоидной мембране интактного 1-го надпочаточного листа у инбредных линий кукурузы (*Zea mays* L.) сербской селекции с вертикально стоящими верхними листьями ZPPL 146 (А) и ZPPL 159 (Б) в зависимости от температуры.

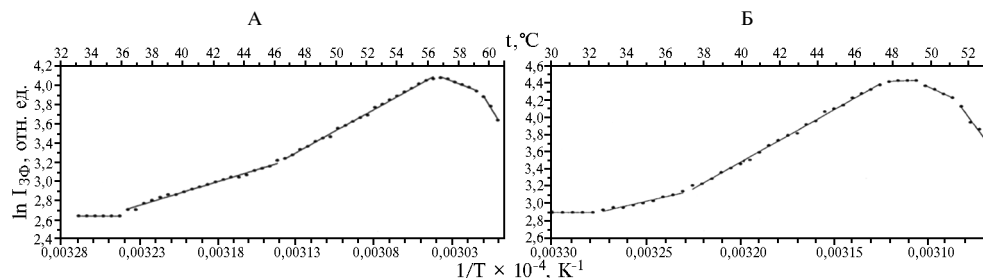


Рис. 4. Изменение натурального логарифма (\ln) интенсивности замедленной флуоресценции хлорофилла ($I_{3Ф}$), характеризующее критические температуры структурных переходов (T по Кельвину, К) в тилакоидной мембране интактного 1-го надпочаточного листа у инбредных линий кукурузы (*Zea mays* L.) сербской селекции с вертикально стоящими верхними листьями ZPPL 146 (А) и ZPPL 159 (Б) (критерий Аррениуса).

Критерий Аррениуса основывается на линеаризации температурной зависимости ЗФ хлорофилла испытуемых линий кукурузы. С его помощью устанавливаются критические температуры (температуры фазовых переходов), при которых происходят структурные изменения в хлоропластах и тилакоидной мембране (рис. 4).

При детальном изучении эффекта температуры на ЗФ хлорофилла (особенно динамики экспериментальной температурной кривой) оценили величины энергии активации (E_a) молекул хлорофилла для критических температур (температуры фазовых переходов) в хлоропластах и тилакоидной мембране испытуемых линий кукурузы с вертикально стоящими верхними листьями ZPPL 146 и ZPPL 159 (табл. 3).

3. Энергия активации (E_a , кДж/моль) хлорофилла в тилакоидной мембране интактного 1-го надпочаточного листа у инбредных линий кукурузы (*Zea mays* L.) сербской селекции с вертикально стоящими верхними листьями для разных критических температур (t , °C)

ZPPL 146		ZPPL 159	
E_a	t	E_a	t
–	34,5	–	32,5
41,00	46,0	42,10	37,0
74,86	56,5	101,20	47,5
50,70	59,5	6,20	49,0
225,50	–	81,10	51,0
		255,00	–

Примечание. Прочерки означают, что для начальных и конечных значений замедленной флуоресценции хлорофилла показатель не рассчитывают.

Таким образом, экспериментальные и расчетные данные, полученные с применением биофизических методов исследования пигментного комплекса и тилакоидных мембран листа (замедление флуоресценции хлорофилла I_{zf} , фазовые переходы в хлоропластах и тилакоидной мембране), свидетельствовали о высокой адаптивности изученных инбредных линий в условиях повышенных и высоких температур, а также засухи.

Те же свойства проявили гибридные формы, полученные с участием этих инбредных линий, что подтвердили испытания, проведенные нами на ряде участков на различных территориях в Юго-Восточной Европе (табл. 4). Представленные результаты также свидетельствовали о функциональной зависимости урожайности от состояния и адаптивного потенциала фотосинтетического комплекса растений и их морфологического соответствия модели эффективного фотосинтеза.

4. Агрономическая характеристика гибридов кукурузы (*Zea mays* L.) сербской селекции при испытании в условиях полевых опытов

Признак, район выращивания	ZP 633	ZP 735	ZP 737
Тип гибрида	SC	SC	SC
Группа спелости (по ФАО)	550-650	750-850	750-850
Высота стебля, см	250	280	290
Высота стебля до початка, см	120	130	135
Масса 1000 зерен, г	380	370	370
Тип зерна	Полузубовидное	Зубовидное	Зубовидное
Густота посева на силос, $\times 10^3$ растений/га	60-70	70-75	70-75
Положение листьев на растении	От полувертикального до вертикального	От полувертикального до вертикального	От полувертикального до вертикального
Устойчивость к засухе	Хорошая	Хорошая	Хорошая
Устойчивость к болезням	Хорошая	Хорошая	Хорошая
Состояние листьев при уборке	Stay-green	Stay-green	Stay-green
Урожайность по силосу, т/га	60-65	70-80	70-80
Урожайность по зерну, т/га	7,819 ^a	8,108 ^b	12,732 ^b
Высота над уровнем моря в районах выращивания, м	300-400	250-400	250-400

Примечание. SC — Single Cross. Данные по зерновой урожайности приведены на основании оценки на 30 географически удаленных участках в Сербии в 2008-2011 годах (a) и 6 — в Греции в 2006-2009 годах (б).

Из данных таблиц 4 и 5 видно, что испытываемые гибриды имеют продолжительный период вегетации, по морфологическим особенностям соответствуют современным представлениям об эффективном габитусе растений, обладают stay-green фенотипом, при котором старение листьев замедляется, и к уборке они остаются зелеными. Кроме того, у этих гибридов свыше 50 % силосной массы составляет зерно, что повышает ее качество. К тому же у них доля зародыша в зерне увеличена более чем на 10 %, что особенно важно для повышения его питательной ценности и качества получаемых продуктов переработки.

5. Морфологическая характеристика початка и структура зерновки у гибридов кукурузы (*Zea mays* L.) сербской селекции

Показатель	ZP 633	ZP 735	ZP 737
Влажность зерна, %	18	19	20
Длина початка, см	22	25	25
Масса початка, г	252,30	286,42	226,70
Число рядов на початке, шт.	16	18	18
Число зерен на початке, шт.	700	800	850
Масса зерна на початке, г	228,36	248,35	200,40
Доля на початке, %:			
перикарпия зерна	5,32	6,55	4,60
зародыша зерна	11,28	12,06	10,70
эндосперма зерна	83,40	81,39	84,70

Отметим, что гибриды ZP 633, ZP 735 и ZP 737 в основном предназначены для производства зерна и силоса (для использования в качестве пищевых продуктов и корма) в агроэкологических условиях Юго-Восточной Европы и в значительно меньшей мере применяются для производства полуфабрикатов и продуктов конечной промышленной переработки.

Поскольку речь идет о перспективных инбредных линиях кукурузы, приведем их основные свойства, ценные с точки зрения селекции и семеноводства (табл. 6). Отметим, что в течение последних 5-6 лет линии ZPPL 146 и ZPPL 159 уже широко используются в селекции кукурузы в Сербии. Эти линии также чаще всего используются в Греции и Македонии, частично в Турции и в южных районах Болгарии.

6. Основные селекционно ценные признаки у элитных инбредных линий кукурузы (*Zea mays* L.) сербской селекции с эффективным фотосинтезом

Признак	ZPPL 146	ZPPL 159
Гетерозисное происхождение	BSSS, USA, Zemun Polje	Местная популяция из Аргентины (S13), скрещенная с линией PE25-10-1, Zemun Polje
Группа спелости (по ФАО)	650-700	550-600
Урожайность зерна при 14 % влажности, кг/га:		
без орошения ^а	3500	2000
с орошением ^б	5000	3000
Плотность посева к уборке, растений/га:		
без орошения	50000	50000
с орошением	60000	60000
Основные характеристики стебля	Стебель средней высоты, обладает свойством многопочатковости (prolific). Метелка с выраженной центральной веткой и небольшим числом боковых веток	Стебель невысокий. Метелка со сжатыми боковыми ветками, которые долго пылят
Устойчивость к полеганию	Стебель обладает хорошей устойчивостью к полеганию	Стебель обладает хорошей устойчивостью к полеганию
Вертикальное положение листьев над початком	< 20,8° (1-й лист) < 17,9° (2-й лист) < 15,3° (3-й лист)	< 21,3° (1-й лист) < 18,1° (2-й лист) < 15,4° (3-й лист)
Stat-green фенотип	Лист сохраняет зеленый цвет вплоть до уборки	Лист сохраняет умеренно зеленый цвет вплоть до уборки
Толерантность к стрессу	Линия толерантна к засухе и высокой температуре	Линия толерантна к засухе и высокой температуре
Характеристика початка	Початок линии полужубовидный, оранжевого цвета, стержень початка белый	Початок линии полукремнистый, оранжевого цвета, стержень початка красный

	20-25	20-25
Влажность зерна при уборке, %		
Динамика потери влаги из зерна в период созревания	Линия не обладает свойством быстрой потери влаги из зерна, но дает хорошие гибриды на силос	
Способ уборки	Легкая ручная и механизированная уборка урожая	
Всхожесть	Линия обладает хорошей всхожестью	
Ранний рост	Линия обладает умеренным ранним ростом	
Пригодность зерна на корм	Зерно гибридов этой линии пригодно на корм жвачных и нежвачных животных, а также для питания людей и промышленной переработки	
Содержание каротина в зерне	33,2 мг/кг ^а 19,0 µg βCE/g d.m. ^б	31,8 мг/кг ^а 18,1 µg βCE/g d.m. ^б
Пригодность для создания гибридов на силос	Линия очень хорошо подходит для создания гибридов на силос	
Переваримость силоса у гибридов	Силос (как из общей биомассы, так и из размолотого зерна) у гибридов, созданных с участием линии, характеризуется высокой переваримостью	
Примечание. Указано содержание каротина в зерне при выращивании без орошения (а) и с орошением (б).		

Обсуждая проблемы селекции кукурузы, следует учитывать ее роль как продукта здорового питания, который в настоящее время недооценен. В кукурузе очень мало жиров, но она высококалорийна (80-100 калорий на початок) из-за высокого содержания углеводов. Кукуруза содержит много растительных волокон, благодаря чему она снижает уровень холестерина и сахара в крови и уменьшает риск рака толстой кишки (37), но в то же время это один из наиболее частых аллергенов. В кукурузе содержится витамин В, фолиевая кислота, магний, что положительно сказывается на работе мозга. Кроме того, витамин С обладает активизирующим и общеукрепляющим эффектом, фосфор прекрасно влияет на кости, а калий необходим для правильной работы К-На насоса в клетке. Известно, что повышение содержания некоторых аминокислот в организме может привести к сердечным заболеваниям (37, 38). Такое состояние возникает из-за недостатка фолиевой кислоты, который успешно профилактируется при употреблении кукурузы в пищу. Фолиевая кислота также необходима для правильного развития нервной системы эмбриона, поэтому кукуруза рекомендуется женщинам в первые 3 мес беременности. Практически в любом виде кукуруза весьма полезна для правильного роста и развития организма, а также для обмена веществ (39, 42). Особо следует отметить роль каротиноидов. Каротиноиды защищают растения от повреждений свободными радикалами, вызванными фотоиндукцией, служат предшественниками гормона абсцисовой кислоты и окрашивают зерно в желтый цвет (39, 42). Благодаря антиоксидантным свойствам каротиноиды предупреждают кардиоваскулярные заболевания, возникновение рака и катаракты.

Уже отмечалось, что за последние 60 лет достигнуты огромные успехи в селекции и производстве семенного материала и товарной кукурузы с использованием различных линий и гибридов. Реализация одной из программ (1978 год, повышение густоты посевов) напрямую повлияла на увеличение урожая этой культуры (12, 13, 40). Позднее появилась программа создания инбредных линий кукурузы с вертикально стоящими верхними листьями (1998 год, линии с эффективным фотосинтезом). Почти в то же время целью селекционных программ становится получение инбредных линий, обогащенных пигментами и другими эссенциальными биогенными нутриентами (7, 11, 19, 21, 22, 37-39).

Представленные данные, полученные с использованием современных инструментальных методов, свидетельствуют о перспективности выделенных элитных инбредных линий ZPPL 146 и ZPPL 159, на основании которых могут целенаправленно создаваться гибриды с обогащенным составом пигментов и нутриентов. Эти линии и уже созданные на их основе

гибриды ZP 633, ZP 735 и ZP 737 богаты прежде всего каротиноидами, окрашивающими зерно хлебных культур (40) и обладающими многими лечебными свойствами (22, 37, 38, 41). Кроме того, такое зерно ценится как корм домашней птицы. Именно эти направления отбора представляются в будущем приоритетными при обеспечении здорового питания населения и качественной кормовой базы.

Итак, полученные инбредные линии ZPPL 146 и ZPPL 159 имеют вертикально стоящие верхние листья, относятся к группе с эффективной моделью фотосинтеза и устойчивы к высоким температурам. Для них характерно высокое содержание каротиноидов, в частности желтых пигментов, и значительное накопление других биологически активных соединений. С помощью метода резонансной Раман-спектроскопии листа зарегистрированы спектральные полосы, отражающие конформационные особенности молекул каротиноидов и других соединений (фосфаты, глютен и амиды III). Выявленные свойства изученных инбредных линий свидетельствуют о перспективности их использования в целевых программах селекции кукурузы на зерно (пищевое и кормовое) и биомассу для производства высококачественного силоса. На основе этих инбредных линий уже созданы гибриды ZP 633, ZP 735 и ZP 737, которые вызывают интерес в связи с высокой урожайностью и составом нутриентов, позволяющим использовать их для производства продуктов здорового питания, корма для домашних животных и птицы, при промышленной переработке. Описаны хозяйственно ценные агрономические и морфологические характеристики гибридов. Приведены данные о химическом составе зерна, структуре и продуктивности при выращивании линий и гибридов сербской селекции в Юго-Восточной Европе.

¹*Institut za kukuruz «Zemun Polje»,*
11185 Beograd-Zemun, ul. Slobodana Bajica 1, Srbija;

²*Fakultet za fizicku hemiju, Univerzitet u Beogradu,*
11000 Beograd, Studentski trg 16, Srbija,
e-mail: radenovic@sbb.rs

Поступила в редакцию
23 декабря 2014 года

Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology], 2015, V. 50, № 5, pp. 600-610

MAIZE (*Zea mays* L.) INBRED LINES AND HYBRIDS OF SERBIAN SELECTION WITH HIGH EFFICIENCY OF PHOTOSYNTHESIS, RICH IN PIGMENT CONTENT AND INCREASED NUTRITIVE VALUE

*Ch. Radenovich^{1, 2}, N. Delich¹, M. Sechansky¹, Zh. Jovanovich¹,
G. Stankovich¹, A. Popovich¹*

¹*Maize Research Institute, Zemun Polje, ul. Slobodana Bajica 1, 11185 Belgrade-Zemun, Serbia, e-mail radenovic@sbb.rs;*

²*Faculty of Physical Chemistry, University of Belgrade, Studentski trg 16, 11000 Belgrade, Serbia*

Acknowledgements:

Financially supported mainly by the Maize Research Institute, Zemun Polje, Belgrade and partly by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia (Projects 03E211, 03E22, TR-20003, TR-20007, TR-20014, reference number 31028 and 31037).

Received December 23, 2014

doi: 10.15389/agrobiology.2015.5.600eng

Abstract

This paper presents results of several different studies that confirm the hypothesis that maize inbred lines rich in proteins and with exceptional nutritive values can be bred. This is also supported by a medicinal standpoint of programmed need for maize-based food and feed. With such an experimental approach, the maize inbred lines ZPPL 146 and ZPPL 159 and hybrids derived from them (ZP 633, ZP 735 and ZP 737) rich in proteins have been systematically tested. Based on concrete results the following we can be conclude as follows. Selected maize inbred lines ZPPL 146 and ZPPL 159, rich in carotenoids, yellow pigments, also have significant amounts of other relevant bioactive compounds. Observed inbred lines have erect top leaves and are classified into a group of maize inbreds with significant properties of the photosynthesis model, are resistant to high temperatures and tolerant to drought. Spectral bands pointing to conformational characteristics of molecules of carotenoids but also of other compounds (phosphates, glutens and amides

III) were established by the resonance Raman spectroscopy method applied to the leaf of the maize inbred line ZPLL 146. Physiological, biochemical and biophysical traits of elite maize inbred lines and their hybrids were observed in this study with a special emphasis on their efficiency of photosynthesis, productivity and suitability for broad use of nutrient values of grain and other essential biogenic matters, first of all pigments that express antioxidative properties. Relevant traits, properties and parameters of observed maize inbred lines that can be used in the process of selection are presented. These prestigious maize inbred lines were used to develop high-yielding and high-quality maize hybrids (ZP 633, ZP 735 and ZP 737) that are recognisable for their quality in human nutrition (children and the elderly), that are confirmed by medical observations related to their use in food and feed. Relevant agronomic and morphological traits of maize hybrids are presented. Moreover, results on grain structure and yields obtained in the regions of south-eastern Europe are also displayed.

Keywords: maize (*Zea mays* L.), inbred lines, hybrid, thylakoid membrane, photosynthetic model, delayed chlorophyll fluorescence, pigment properties, nutritive value.

REFERENCES

1. Duvick D.N. Genetic contribution to yield gains of U.S. Hybrid maize, 1930 to 1980. In: *Genetic contributions to yield gains of five major crop plants* /W.R. Fehr (ed.). CSSA, Special Publication 7, Crop Science Society of America, American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, 1984: 15-47.
2. Sprague G.F. Organization of breeding programs. *20th Ann. Illinois Corn Breeding School (USA)*, 1984, 20: 20.
3. Trifunović V. Četrdeset godina moderne selekcije kukuruza u Jugoslaviji. *Zbornik radova Nau nog skupa «Genetika i oplemenjivanje kukuruza — dostignu a i nove mogu nosti», 11-12 decembar 1986, Beograd, Jugoslavija*. Beograd, 1986: 5-46.
4. Dumanović J. Savremeni programi oplemenjivanja kukuruza. *Zbornik radova Nau nog skupa «Genetika i oplemenjivanje kukuruza — dostignu a i nove mogu nosti», 11-12 decembar 1986, Beograd, Jugoslavija*. Beograd, 1986: 77-94.
5. Hallauer A.R. Modern methods in maize breeding. *Proc. Workshop on Maize Breeding and Maize Production EUROMAIZE '88, October 6-8, 1988, Belgrade, Yugoslavia*. Belgrade, 1988: 1-20.
6. Kojić L., Ivanović M. Dugoro ni programi oplemenjivanja kukuruza. *Zbornik radova Nau nog skupa «Genetika i oplemenjivanje kukuruza — dostignu a i nove mogu nosti», 11-12 decembar 1986, Beograd, Jugoslavija*. Beograd, 1986: 57-75.
7. Petrović R., Filipović M., Vidaković M. Identification of sources containing useful alleles for improving parents of superior maize single crosses (*Zea mays* L.). *Genetika*, 1992, 24(2): 115-126.
8. Ivanović M., Petrović R., Drinić G., Trifunović V., Kojić L., Vuković M., Mišović M., Radović G., Ristanović D., Pajić Z., Trifunović B.V. Pedeset godina selekcije ZP hibrida kukuruza. *Knjiga radova Simpozijuma sa međunarod. učešćem «Oplemenjivanje, proizvodnja i iskorišćavanje kukuruza — 50 godina Instituta za kukuruz «Zemun Polje», 28-29 septembar 1995, Beograd, Jugoslavija*. Beograd, 1995: 3-16.
9. *Kukuruz na pragu trećeg milenijuma — se anja, kazivanja i predvi anja* /Č. Radenović, M. Somborac (urednici). Institut za kukuruz «Zemun Polje», Beograd, 2000.
10. Radenović M. Review, a study of delayed fluorescence in plant models: photo-synthetic, transportation and membrane processes. *J. Serb. Chem. Soc.*, 1994, 59(9): 595-617.
11. Pajić Z., Mišović M., Dumanović J., Mišević D., Babić M., Saratlić G. Selekcija kukuruza specifičnih svojstava i namene. *Knjiga radova Simpozijuma sa među-narodnim učešćem «Oplemenjivanje, proizvodnja i iskorišćavanje kukuruza — 50 godina Instituta za kukuruz «Zemun Polje», 28-29 septembar 1995, Beograd, Jugoslavija*. Beograd, 1995: 229-237.
12. Radenović Č., Atarić I., Husić I., Mišović M.M., Filipović M., Kojić L. A study of functioning of thylakoid membranes in inbred lines of maize (*Zea mays* L.). *Genetika*, 2001, 32(3): 377-386.
13. Radenović Č., Babić M., Hojka Z., Stanković G., Trifunović B.V., Ristanović D., Delić N., Selaković D. *Doklady Rossijskoj akademii sel'skokho-zyaistvennykh nauk*, 2004, 2: 7-9.
14. Radenović Č., Filipović M., Babić M., Stanković G., Radojčić A., Sečanski M., Pavlov J., Branković D., Selaković D. Actual prestigious properties of maize inbred lines — a good initial basis for the efficient development of new and yielding maize hybrids. *Genetika*, 2008, 40(2): 121-133.
15. Radenović Č., Filipović M., Anđelković V., Babić M., Radojčić A. Significant breeding properties of inbred maize lines as the basis for creating new, higher yielding hybrids. *Russian Agricultural Sciences*, 2009, 35(6): 374-377.
16. Konstantinov K., Mladenović-Drinić S., Anđelković V., Babić M. Ethics in scientific results application: gene and life forms patenting. *Genetika*, 2010, 42(1): 195-208.
17. Bekrić V. Kvalitet kukuruza i kako ga meriti. U: *Upotreba kukuruza*. Institut za kukuruz «Zemun Polje», Beograd-Zemun, 1997: 201-204.

18. Bekrić V. *Industrijska proizvodnja sto ne hrane*. Institut za kukuruz «Zemun Polje», Beograd, 1999.
19. Dumanović J., Pajić Z. *Specifi ni tipovi kukuruza*. Institut za kukuruz «Zemun Polje», Beograd, 1998.
20. Pejić Đ. *Sila ni kukuruz — tehnologija proizvodnje i siliranja*. Institut za kukuruz «Zemun Polje», Beograd, 1994.
21. Liu R.H. Whole grain phytochemicals and health. *J. Cereal Sci.*, 2007, 46: 207-219 (doi: 10.1016/j.jcs.2007.06.010).
22. Strati I.F., Sinanoglou V.J., Kora L., Miniadis-Meimaroglou S., Oreopoulou V. Carotenoids from foods of plant, animal and marine origin: an efficient HPLC-DAD separation method. *Foods*, 2012, 1: 52-65.
23. Radosavljević M., Bekrić V., Božović I., Jakovljević J. Physical and chemical properties of various corn genotypes as a criterion of technological quality. *Genetika*, 2000, 32(3): 319-329.
24. *Corn: chemistry and technology* /P.J. White, L.A. Jonson (eds.). American Association of Cereal Chemists, Minnesota, USA, 2003: 71-101.
25. AACC 1995. Pigment. Methods 14-50. In: *AACC methods*. American Association of Cereal Chemists, Minnesota, USA, 1995.
26. Radenović Č., Grodzinski D.M., Filipović M., Radosavljević M.M., Videnović Ž.V., Denić M.P., Čamdžija Z.F. The prestigious maize inbred lines and hybrids with erect top leaves are characterised by a property of an efficient photosynthetic model and a satisfactory base for the further progress in breeding and selection. *Physiology and biochemistry of cultivated plants*, 2010, 42(3): 187-201.
27. Radenović Č., Jeremić M., Maximov G.V., Filipovović M., Trifunović B.V., Mišović M.M. Mogućnost korišćenja ramanske spektroskopije u proučavanju otpornosti inbred linija kukuruza prema uslovima stresa. *Savremena poljoprivreda*, 1994, 42(1-2): 5-19.
28. Radenović Č., Jeremić M., Maximov G.V., Mišović M.M., Trifunović B.V. Resonance Raman spectra of carotenoids in the maize seed tissue — a new approach in studies on effects of temperatures and other environmental factors on the state of vital functions. *J. Sci. Agric. Res.*, 1994, 55(4): 33-47.
29. Radenović Č., Jeremić M., Maximov G.V., Mišović M.M., Selaković D., Trifunović B.V. Rezonantni ramanski spektri semena kukuruza i njihova primena u proučavanju životnih funkcija. *Proc. Symp. «Oplemenjivanje, proizvodnja i iskorišćavanje kukuruza — 50 godina Instituta za kukuruz «Zemun Polje», 28-29 septembar 1995, Beograd, Jugoslavija*. Beograd, 1995: 291-296.
30. Radenović Č., Jeremić M., Maximov G.V., Mišović M.M., Selaković D. Resonance Raman spectra of carotenoids in the maize kernel — a contribution to the evaluation of the kernels resistance to the temperature and the chemical composition of soil. *Proceedings for Natural Science, Matica Srpska (Novi Sad)*, 1998, 95: 41-50.
31. Radenović Č., Babić M., Delić N., Atarić I., Kojić L. *Kukuruza i sorgo*, 2002, 4: 21-24.
32. Radenović Č., Konstantinov K., Delić N., Stanković G. Photosynthetic and bioluminescence properties of maize inbred lines with upright leaves. *Maydica*, 2007, 52(3): 347-356.
33. Radenović Č., Filipović M., Babić M. *Meduzavisanost procesa zakasnele fluorescencije hlorofila, fotosinteze i oplemenjivanja kukuruza*. Matica Srpska, Novi Sad, Institut za kukuruz «Zemun Polje», Beograd, 2013.
34. Radenović Č., Simić M., Srdić J., Dumanović Z. Long term effects of different soil tillage systems on maize (*Zea mays* L.) yields. *Plant, Soil and Environment*, 2011, 57(4): 186-192.
35. Radenović Č. *Programirana ishrana dece kukuruzom doprinosi regulisanju metabolizma njihovog efikasnog rastanja i razvika*. Društvo biofizičara Srbije (Interna publikacija), Beograd, 1991.
36. Karnaukhov V.N. *Biologičeskie funkcii karotinoïdov* [Biological functions of carotenoids]. Moscow, 1988.
37. Granado F., Olmedilla B., Blanco I. Nutritional and clinical relevance of lutein in human health. *Br. J. Nutr.*, 2003, 90: 487-502.
38. Kurilich A.C., Juvik J.A. Quantification of carotenoid and tocopherol antioxidants in *Zea mays* L. *J. Agric. Food Chem.*, 1999, 47: 1948-1955.
39. Luo Y., Wang Q. Bioactive compounds in corn. In: *Cereals and pulses: nutraceutical properties and health benefits* /Liangli (Lucy) Yu, Rong Tsao, Fereidoon Shahidi (eds.). Wiley-Blackwell, 2012: 85-103 (ISBN: 9781118229460).
40. Abdel-Aal E.M., Young C., Rabbalski I. Anthocyanin composition in black, blue, pink, purple, and red cereal grains. *J. Agric. Food Chem.*, 2006, 54: 4696-4704 (doi: 10.1021/jf0606609).
41. Bacchetti T., Masciangelo S., Micheletti A., Ferretti G. Carotenoids, phenolic compounds and antioxidant capacity of five local Italian sorn (*Zea mays* L.) kernels. *Journal of Nutrition and Food Science*, 2013, 3(6): 1-4.
42. Weber E.J. Carotenoids and tocopherols of corn grain determined by HPLC. *J. Am. Oil Chem.*, 1987, 64: 1129-1134 (doi: 10.1007/BF02612988).