

УДК 633.111.1:57.03

UDC 633.111.1:57.03

4.1.2. Селекция, семеноводство и биотехнология растений (биологические науки, сельскохозяйственные науки)

4.1.2. Breeding, Seed Production, and Biotechnology of Plants (Biological Sciences, Agricultural Sciences)

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЗЕРНА
КУКУРУЗЫ ЗА СЧЁТ УВЕЛИЧЕНИЯ
СОДЕРЖАНИЯ КАРОТИНОИДОВ И
УЛУЧШЕННЫХ АГРОНОМИЧЕСКИХ
ПРИЗНАКОВ**

**IMPROVING THE QUALITY OF CORN GRAIN
BY INCREASING CAROTENOID CONTENT
AND ENHANCED AGRONOMIC TRAITS**

Сергиенко Игорь Николаевич
Младший научный сотрудник
*Кубанский государственный аграрный
университет, Россия, 350044, Краснодар,
Калинина, 13*

Sergienko Igor Nikolaevich
Junior Research Associate
*Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia,
350044, Kalinina, 13*

Батурьян Маргарита Аветисовна
Канд. филологических наук
SPIN-код: 8262-0135
*Кубанский государственный аграрный
университет, Россия, 350044, Краснодар,
Калинина, 13*

Baturyan Margarita Avetisovna
Candidate of Philological Sciences
RSCI PIN – code: 8262-0135
*Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia,
350044, Kalinina, 13*

В данной статье представлены результаты комплексного исследования самоопылённых линий кукурузы (*Zea mays* L.) и полученных на их основе гибридов F₁, проведённого в Национальном центре зерна им. П.П. Лукьяненко (Краснодарский край) в 2022–2023 гг. Основное внимание уделено оценке содержания каротиноидов (лютеин, зеаксантин, β-криптоксантин, β-каротин) и агрономических показателей (урожайность, полегание, содержание сухого вещества). Путём анализа общей комбинационной способности (ОКС) материнских и отцовских линий выявлены источники, способствующие повышению общих каротиноидов без потери урожайности. Наиболее перспективные гибриды (например, А390×Т62, А452×Т302, А447×Т302 и др.) проявили значительное превышение среднего по содержанию каротиноидов (до 25,08 мкг/г) и одновременно высокую урожайность (8–9,4 т/га). Полученные данные подтверждают возможность комплексного отбора линий кукурузы, ориентированного на повышение пищевой ценности зерна и улучшенные агрономические признаки

This study presents the results of a comprehensive evaluation of maize inbred lines and their F₁ hybrids, conducted at the National Grain Centre named after P.P. Lukyanenko (Krasnodar Krai, Russia) in 2022–2023. The research focused on analyzing carotenoid content (lutein, zeaxanthin, β-cryptoxanthin, and β-carotene) and key agronomic traits (yield, lodging resistance, and dry matter content). By assessing the general combining ability (GCA) of parental lines, we identified promising sources that contribute to increased total carotenoids without compromising grain yield. The most promising hybrids (e.g., А390×Т62, А452×Т302, А447×Т302) exhibited significantly higher carotenoid levels (up to 25.08 μg/g) alongside high grain yields (8–9.4 t/ha). These findings demonstrate the feasibility of simultaneous selection for improved nutritional quality (carotenoid enrichment) and superior agronomic performance in maize breeding programs

Ключевые слова: КУКУРУЗА, ZEA MAYS L., КАРОТИНОИДЫ, ЛЮТЕИН, ЗЕАКСАНТИН, В-КРИПТОКСАНТИН, В-КАРОТИН, УРОЖАЙНОСТЬ, СОЧЕТАННАЯ СЕЛЕКЦИЯ, БИОХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Keywords: CORN ZEA MAYS L., CAROTENOIDS, LUTEIN, ZEAXANTHIN, B-CRYPTOXANTHIN, B-CAROTENE, YIELD, COMBINED SELECTION, BIOCHEMICAL COMPOSITION

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-209-037>

Введение

Современная селекция кукурузы (*Zea mays* L.) призвана одновременно решать задачи повышения урожайности и улучшения пищевых качеств зерна, включая содержание белка, жиров, витаминов и каротиноидов [4]. Последние обладают антиоксидантными свойствами и являются предшественниками витамина А, что делает их значимыми для здоровья человека и животных [16, 13]. Несмотря на то, что концентрация каротиноидов в кукурузе обычно ниже, чем в большинстве овощей и фруктов, широта её возделывания и универсальность использования превращают эту культуру в один из глобально доступных источников данных соединений [6, 7].

В Национальном центре зерна им. П.П. Лукьяненко (Краснодарский край) ведутся исследования, направленные на повышение урожайности кукурузы и параллельное улучшение биохимического состава зерна — в том числе по содержанию каротиноидов (лютеин, зеаксантин, β -криптоксантин, β -каротин). Настоящая работа объединяет результаты оценки самоопылённых линий (материнских и отцовских) по уровню каротиноидов и характеризует агрономические показатели ряда полученных гибридов (F_1) на протяжении двух вегетационных сезонов (2022 и 2023 гг.) [5]. Особое внимание уделено показателям общей комбинационной способности (ОКС), а также вариации ключевых компонентов качества (белок, жир, клетчатка) в зерне гибридов [11, 19].

Материалы и методы

1. Генетический материал

В исследовании участвовали пять материнских (А-линий) и десять отцовских (Т-линий) самоопылённых линий кукурузы, различающихся по уровню продуктивности, срокам созревания и биохимическим характеристикам зерна.

Материнские линии (А-линии): А390, А447, А452, А48

Отцовские линии (Т-линии): T158, T382, T302, T4, TN, T54, T51, T62, T43

Каждую материнскую линию скрещивали с рядом отцовских, получая гибриды F₁, которые затем оценивали по агрономическим и биохимическим признакам.

2. Условия проведения опыта

Опытные поля Национального центра зерна им. П.П. Лукьяненко (Краснодарский край) использовались для закладки опытов в течение двух сезонов (2022 и 2023 гг.). Посевы осуществляли в 2-рядных делянках длиной 7 м, междурядье 70 см; площадь — 9,8 м², в трёх повторностях. Урожайность рассчитывали в т/га с учётом стандартной влажности 14%.

3. Методы химического анализа

Определение содержания каротиноидов

Экстракция ацетоном или смесью органических растворителей из предварительно высушенного и измельчённого зерна (3–5 г).

Очищенный экстракт анализировали спектрофотометрически либо методом ВЭЖХ (при необходимости дифференцировать лютеин, зеаксантин, β-криптоксантин, β-каротин) [18].

Выражение результатов в мкг/г сухого вещества.

Анализ белка, жира и клетчатки

Белок: метод Кьельдаля, перевод азота в сырую протеиновую форму (N×6,25) [1].

Жир: определение экстракцией эфиром (Сокслет) с пересчётом на сухое вещество [1].

Клетчатка: гравиметрический метод (ГОСТ), выражение в процентах от сухого вещества.

4. Оценка агрономических признаков

Урожайность (т/га). Машинная уборка с каждой делянки, пересчёт на стандартную влажность.

Сухое вещество (%). Высушивание пробы зерна при 105 °С до постоянной массы.

Полегание (%). Оценка процента неполегших растений к моменту уборки (100% = все растения вертикальны).

5. Статистический анализ

Дисперсионный анализ (ANOVA) для выявления значимости факторов «линия», «год», а также различий между гибридами. Использовались программные пакеты Statistica 10, Уровень значимости: $p < 0,05$; $p < 0,01$; $p < 0,001$.

Общая комбинационная способность (ОКС) рассчитывалась по методике Гриффинга (Griffing, 1956) для оценки аддитивных генетических эффектов [8]. Формально:

$$GCA_i = \overline{Y_{i.}} - \overline{Y_{..}}$$

Где $\overline{Y_{i.}}$ — среднее значение для всех гибридов с участием i -й линии, $\overline{Y_{..}}$ — общее среднее по опыту. Положительные значения GCA указывают на повышающий эффект линии, отрицательные — на понижающий.

Гетерозис по среднему родителю (МРН%).

$$\text{МРН}\% = \frac{\left(F_1 - \frac{P_1 + P_2}{2}\right)}{\frac{P_1 + P_2}{2}} \times 100$$

где F_1 — значение признака у гибрида, P_1 и P_2 — у родительских линий. Использовался для оценки эффекта превышения гибридом среднего родительского уровня по каротиноидам или урожайности.

Результаты исследований

В рамках настоящего исследования был осуществлён многоступенчатый анализ генетического материала, включающего первичную характеристику родительских самоопылённых линий по содержанию каротиноидов, оценку общей комбинационной способности (ОКС) материнских и отцовских линий, а также комплексную проверку агрономических показателей и концентрации пигментов в полученных гибридах F₁ [2].

Первым шагом явилось сравнение самоопылённых линий по уровню общих и отдельных фракций каротиноидов (лютеин, зеаксантин, β-криптоксантин, β-каротин) [15]. Данные таблицы 1 свидетельствуют, что у материнских линий (A390, A447, A452, A483) показатель общих каротиноидов колеблется в пределах 10,64–19,08 мкг/г.

Таблица 1. Содержание каротиноидов в родительских самоопылённых линиях

Линия	Общие каротиноиды (мкг/г)	Лютеин (мкг/г)	Зеаксантин (мкг/г)	β-Криптоксантин (мкг/г)	β-Каротин (мкг/г)
Материнские					
A390	16,32	4,47	6,02	0,88	0,54
A447	18,92	8,38	7,07	1,55	0,52
A452	10,64	4,83	3,78	0,14	0,48
A483	19,08	5,33	6,85	1,42	0,65
Отцовские					
T158	17,54	3,33	7,01	2,63	2,98
T382	21,76	5	7,83	4,79	3,05
T302	40,2	12,46	14,07	6,43	3,22
T4	29,82	19,68	2,68	2,68	2,98
TN	2,3	0,46	0,69	0,35	0,35
T54	7,52	2,89	3,25	1,44	0,72
T51	13,38	4,28	4,55	1,74	1,34
T62	32,12	4,18	15,74	4,18	1,28
T43	18,64	8,95	2,98	3,17	1,86

Максимальное значение обнаружено у A483 (19,08 мкг/г), что уже может служить хорошей основой для повышения уровня пигментов в

последующих гибридах. В то же время А452 показывает лишь 10,64 мкг/г, но при этом у неё неплохие показатели по другим критериям (например, урожайность) [12]. У отцовских линий диапазон шире (2,30–40,20 мкг/г): экстраординарно высоки значения у Т302 (40,20 мкг/г), обусловленные внушительной концентрацией β -криптоксантин (6,43 мкг/г) и β -каротин (3,22 мкг/г). Это же касается Т62 (15,74 мкг/г зеаксантина) и Т4 (19,68 мкг/г лютеина), которые потенциально являются «донорами» отдельных ценных фракций каротиноидов [9]. Такие существенные различия служат предпосылкой для гетерозисного эффекта в гибридном поколении, особенно если учесть вариацию по другим важным признакам [10].

Следующим этапом была проведена оценка общей (аддитивной) комбинационной способности (ОКС) материнских (таблица 2) и отцовских (таблица 3) линий по ключевым признакам, включая урожайность, содержание белка, жира, клетчатки и каротиноиды [14].

Таблица 2. ОКС (аддитивные эффекты) материнских линий

Признак	A390	A447	A452	A483
Урожайность (т/га)	+0,19 ns	+0,68 *	+1,10 **	+0,55 ns
Белок (%)	−0,08 ns	+0,15 ns	+0,28 *	+0,12 ns
Жир (%)	−0,39 ns	+0,10 ns	−0,05 ns	+0,40 **
Клетчатка (%)	+0,19 ns	+0,05 ns	−0,12 ns	+0,14 ns
Общие каротиноиды	+0,26 ns	+0,53 *	+0,20 ns	+0,61 **
Лютеин (мкг/г)	−0,54 ns	+0,40 ns	+0,72 **	+0,15 ns
Зеаксантин (мкг/г)	+0,55 *	+0,12 ns	−0,10 ns	+0,22 ns
β -криптоксантин (мкг/г)	+0,15 ns	+0,31 ns	+0,05 ns	+0,03 ns
β -каротин (мкг/г)	+0,10 ns	+0,06 ns	+0,30 ns	+0,19 ns

(*** = $p < 0,001$; ** = $p < 0,01$; * = $p < 0,05$; ns = *незначимо*.)

Например, в таблице 2 хорошо видно, что среди А-линий А452 имеет наибольший положительный эффект по урожайности (+1,10 т/га, $p < 0,01$), а также усиливает лютеин и общие каротиноиды ($p < 0,05 \dots 0,01$). Линия А483

проявляет себя как «донор» жиров (+0,40 %, $p < 0,01$) и также усиливает общий пигментный профиль (+0,61 мкг/г, $p < 0,01$). У А390 замечен положительный вклад в зеаксантин, хотя его эффект на урожайность статистически незначим.

Таблица 3. ОКС (аддитивные эффекты) отцовских линий

Признак	T158	T382	T302	T4	TN	T54	T51	T62	T43
Урож. (т/га)	-0,75 ns	+0,12 ns	+1,62 **	+1,10 **	-1,10 ns	-0,20 ns	-0,15 ns	+0,85 ns	+0,05 ns
Белок (%)	-0,06 ns	+0,24 *	+0,31 *	+0,42 **	-0,08 ns	-0,10 ns	+0,04 ns	+0,25 *	+0,09 ns
Жир (%)	+0,02 ns	+0,28 *	+0,40 **	+0,10 ns	-0,15 ns	+0,05 ns	+0,07 ns	+0,33 **	-0,07 ns
Клет. (%)	+0,17 ns	+0,14 ns	+0,20 ns	+0,26 *	+0,13 ns	+0,08 ns	-0,05 ns	+0,15 ns	+0,11 ns
Общий каротин.	-0,11 ns	+0,50 *	+1,00***	+0,75 **	-0,45 ns	-0,08 ns	-0,14 ns	+0,64 **	+0,22 ns
Лютеин (мкг/г)	-0,64 ns	+0,18 ns	+0,84 **	+1,40***	-0,02 ns	-0,05 ns	+0,19 ns	+0,25 ns	+0,43 *
Зеаксантин (мкг/г)	+0,53 *	+0,72 **	+1,10***	+0,30 ns	+0,06 ns	+0,09 ns	-0,10 ns	+1,20***	+0,14 ns
β -криптоксантин (мкг/г)	-0,08 ns	+0,49 *	+0,90 **	+0,22 ns	-0,15 ns	+0,03 ns	+0,01 ns	+0,40 ns	+0,20 ns
β -каротин (мкг/г)	0 ns	+0,30 ns	+0,66 **	+0,50 *	-0,20 ns	+0,10 ns	+0,05 ns	+0,24 ns	+0,09 ns

(*** = $p < 0,001$; ** = $p < 0,01$; * = $p < 0,05$; ns = незначимо.)

В таблице 3 отражены аналогичные расчёты для Т-линий: наиболее сильный положительный вклад по совокупности признаков (урожай и пигменты) обнаружен у Т302 и Т62. Так, Т302 повышает общие каротиноиды до +1,00 *** ($p < 0,001$), а Т62 особенно мощно влияет на зеаксантин (+1,20 ***, $p < 0,001$) [20]. Наличие подобных «доноров» как среди материнских, так и отцовских линий создаёт благоприятные условия для получения гибридов, сочетающих высокую продуктивность и улучшенный каротиноидный профиль.

Подтверждение этому мы видим, обращаясь к агрономическим показателям гибридов (таблица 4). Здесь сравнены результаты по урожайности (т/га), полеганию (%) и содержанию сухого вещества (%) для нескольких наиболее перспективных комбинаций F₁, отобранных на основании ранее выявленных преимуществ их родительских форм [17]. Так, гибрид «А390×Т302» отличается урожайностью в 9,40 т/га ($p < 0,001$) при относительно низком уровне полегания (94 % неполегших растений) и среднем значении сухого вещества.

Таблица 4. Агрономические показатели лучших гибридов (F₁)

Материнская линия	Отцовская линия	Урожайность (т/га)	Полегание (%)	Сухое вещество (%)
A390	T302	9,40 ***	94 ns	78,4 ns
A452	T302	8,49 ***	93 ns	77,4 ns
A447	T302	8,87 ***	97 ns	75,9 00
A452	TN	8,51 ***	92 ns	75,6 00
A483	T302	8,05 *	97 ns	77,6 ns
A390	T62	7,51 0	95 ns	79,6 *
A447	T62	7,24 ns	95 ns	79,1 ns
A483	T158	8,03 **	95 ns	78,2 ns
A483	T4	8,12 **	96 ns	79,1 ns

(*** = $p < 0,001$; ** = $p < 0,01$; * = $p < 0,05$; ns = незначимо.)

Сходные итоги характерны и для «А447×Т302» (8,87 т/га, $p < 0,001$) и «А452×Т302» (8,49 т/га, $p < 0,001$). Интерес представляет «А483×Т302» (8,05 т/га, $p < 0,05$), который хоть и даёт чуть меньшую прибавку, но, согласно результатам биохимических анализов, отличается достойным уровнем каротиноидов и содержания жиров в зерне. Наблюдаемая динамика подтверждает, что использование линий с высокими ОКС по урожаю и пигментам действительно оправдано с точки зрения продуктивности.

Наиболее наглядно содержание каротиноидов в зерне готовых гибридов демонстрирует таблица 5.

Из этой таблицы следует, что гибриды «А390×Т62», «А452×Т302» и «А447×Т302» способны поднимать общий уровень каротиноидов до 21,85–

25,08 мкг/г, что выше среднего значения по опыту (~17 мкг/г). При этом «А390×Т62» особенно выделяется повышенной концентрацией зеаксантина (9,34 мкг/г), тогда как «А452×Т302» и «А447×Т302» показывают максимальные цифры лютеина (свыше 9,75–10,22 мкг/г). Гибрид «А483×Т158», в свою очередь, оказывается лидером по β-криптоксантину (1,59 мкг/г, $p < 0,001$) и β-каротину (0,94 мкг/г, $p < 0,01$), что делает его перспективным источником провитаминовых соединений.

Таблица 5. Содержание каротиноидов в зерне лучших гибридов кукурузы (F₁)

Гибрид	Общие каротиноиды (мкг/г)	Лютеин (мкг/г)	Зеаксантин (мкг/г)	β-криптоксантин (мкг/г)	β-каротин (мкг/г)
A390 × T62	25,08 ***	8,62 ***	9,34 ***	1,50 **	0,67 ns
A452 × T302	22,32 ***	9,75 ***	6,91 ***	0,95 ns	0,53 ns
A447 × T302	21,85 ***	10,22 ***	6,45 ***	1,23 ns	0,56 ns
A483 × T158	21,51 ***	7,06 ns	7,55 ***	1,59 ***	0,94 **
A452 × T4	20,75 ***	11,56 ***	4,69 000	0,70 ns	0,57 ns
A390 × T382	17,82 ns	5,46 *	6,98 ***	1,39 *	0,71 ns
A447 × T62	16,53 ns	5,79 *	5,63 ns	1,16 ns	0,41 ns
A483 × T4	15,19 *	4,05 ***	5,09 ns	0,94 ns	0,69 ns

(*** = $p < 0,001$; ** = $p < 0,01$; * = $p < 0,05$; ns = незначимо)

Любопытен факт, что даже гибриды с чуть более низким уровнем общих каротиноидов (16–18 мкг/г) нередко имеют преимущества по другим признакам (клетчатка, полегание, раннеспелость и т. д.). Таким образом, комбинаторика родительских форм, основанная на анализе ОКС и показателей их зерна, действительно даёт возможность получать

продуктивные и одновременно обогащённые каротиноидами гибриды кукурузы [3].

Заключение

Проведённое исследование показало, что среди самоопылённых материнских линий (А390, А447, А452, А483) и отцовских (Т302, Т62, Т4 и др.) имеются генотипы, обладающие высокой концентрацией каротиноидов и положительной ОКС по этому признаку.

Наиболее ценными «донорами» общих каротиноидов являются Т302 (40,20 мкг/г), Т62 (15,74 мкг/г зеаксантина), Т4 (19,68 мкг/г лютеина). Материнские линии А452 и А483 обеспечивают позитивный эффект по урожайности (до +1,10 т/га) и жиру.

Полученные гибриды (например, А390×Т62, А452×Т302, А447×Т302, А483×Т158) совмещают высокий уровень каротиноидов (до 25,08 мкг/г) и урожайность 8–9,4 т/га, а некоторые формы выделяются повышенным содержанием лютеина или β-криптоксантина/β-каротина.

Результаты подтверждают возможность комплексного отбора линий кукурузы, ориентированного на повышение пищевой ценности зерна без снижения продуктивности. Такие гибриды имеют перспективу в дальнейших селекционных программах, особенно в контексте биообогащения продуктов питания провитамином А и антиоксидантами.

Список используемой литературы

1. AOAC International. Official methods of analysis of AOAC International. – AOAC international, 2000. – Т. 17. – №. 1-2.
2. Amegbor I. K. et al. Heritability and associations among grain yield and quality traits in quality protein maize (QPM) and non-QPM hybrids //Plants. – 2022. – Т. 11. – №. 6. – С. 713.
3. Bouis H. Reducing mineral and vitamin deficiencies through biofortification: progress under HarvestPlus //Hidden hunger: strategies to improve nutrition quality. – Karger Publishers, 2018. – Т. 118. – С. 112-122.
4. Bouis H. E., Welch R. M. Biofortification—a sustainable agricultural strategy for reducing micronutrient malnutrition in the global south //Crop science. – 2010. – Т. 50. – С. S-20-S-32.

5. Djalovic I. et al. Nutritional and Chemical Quality of Maize Hybrids from Different FAO Maturity Groups Developed and Grown in Serbia //Plants. – 2024. – T. 13. – №. 1. – C. 143.
6. Dube N. et al. β -Carotene bioaccessibility from biofortified maize (*Zea mays*) is related to its density and is negatively influenced by lutein and zeaxanthin //Food & function. – 2018. – T. 9. – №. 1. – C. 379-388.
7. Faostat F. A. O. Available online: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (accessed on January 2018). – 2017.
8. Griffing B. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems //Australian journal of biological sciences. – 1956. – T. 9. – №. 4. – C. 463-493.
9. Gupta H. S., Hossain F., Muthusamy V. Biofortification of maize: An Indian perspective //Indian Journal of Genetics and Plant Breeding. – 2015. – T. 75. – №. 01. – C. 1-22.
10. Hallauer A. R., Carena M. J., Miranda Filho J. B. Quantitative genetics in maize breeding. – Springer Science & Business Media, 2010. – T. 6.
11. Maqbool M. A., Beshir Issa A. R., Khokhar E. S. Quality protein maize (QPM): Importance, genetics, timeline of different events, breeding strategies and varietal adoption //Plant Breeding. – 2021. – T. 140. – №. 3. – C. 375-399.
12. Menkir A. et al. Carotenoid diversity in tropical-adapted yellow maize inbred lines //Food chemistry. – 2008. – T. 109. – №. 3. – C. 521-529.
13. Muntean E. Carotenoids in several Transylvanian maize hybrids //Presented at the 1st International Electronic Conference on Plant Science. – 2020. – T. 1. – C. 15.
14. Ochieng' I. O. et al. Optimizing maize yield, nitrogen efficacy and grain protein content under different N forms and rates //Journal of Soil Science and Plant Nutrition. – 2021. – T. 21. – №. 3. – C. 1867-1880.
15. Ortiz-Monasterio J. I. et al. Enhancing the mineral and vitamin content of wheat and maize through plant breeding //Journal of Cereal Science. – 2007. – T. 46. – №. 3. – C. 293-307.
16. Pillay K. et al. Provitamin A carotenoids in biofortified maize and their retention during processing and preparation of South African maize foods //Journal of food science and technology. – 2014. – T. 51. – C. 634-644.
17. Sarca T., Cosmin O., Antohe I. Cercetări și realizări în ameliorarea porumbului la Fundulea //An. INCDA Fundulea, LXXV, Volum jubiliar. – 2007. – C. 99-135.
18. Scrob S. et al. Total content of carotenoids in corn landraces and their potential health applications //Bulletin UASVM Food Science and Technology. – 2014. – T. 71. – №. 2. – C. 96-100.
19. Shawa H., van Biljon A., Labuschagne M. T. Protein quality and quantity of quality protein maize (QPM) and non-QPM hybrids under optimal and low nitrogen conditions //Cereal Chemistry. – 2021. – T. 98. – №. 3. – C. 507-516.
20. Suwarno W. B. et al. Formation of heterotic groups and understanding genetic effects in a provitamin A biofortified maize breeding program //Crop Science. – 2014. – T. 54. – №. 1. – C. 14-24.