

УДК 633.15:577.34:58.085

СОСТОЯНИЕ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ В ЛИСТЯХ ИНБРЕДНЫХ ЛИНИЙ И ГИБРИДОВ КУКУРУЗЫ

Е.В. ТЮТЯЕВ¹, В.В. ШУТОВА¹, Г.В. МАКСИМОВ², Ч.Н. РАДЕНОВИЧ³,
Д.М. ГРОДЗИНСКИЙ⁴

¹Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева
430005 Саранск, ул. Большевикская, 68, Российская Федерация

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119991 Москва, Ленинские горы, Российская Федерация

³Научно-исследовательский институт кукурузы «Земун поле»
11080 Белград-Земун, Сербия

e-mail: radenovich@sbb.rs

⁴Институт клеточной биологии и генетической инженерии Национальной
академии наук Украины

03143 Киев, ул. Академика Заболотного, 148

e-mail: dmgrad@gmail.com

Исследовали состояние фотосинтетических пигментов в листьях инбредных линий и гибридов кукурузы. Установлено, что у инбредных линий кукурузы в отличие от гибридов сильно варьирует соотношение хл *a*/хл *b*, однако количество молекул каротиноидов, приходящихся на одну молекулу хлорофилла, сильно изменяется у гибридов, что практически не характерно для инбредных линий. Спектроскопией комбинационного рассеяния света (КРС) доказано, что каротиноиды в листьях как гибридов, так и инбредных линий находятся преимущественно в *транс*-конфигурации, конформация полиеновой цепочки молекулы существенно не изменяется, однако вклад валентных колебаний метильных групп (особенно у гибрида ZP 341) и пространственная ориентация атомов в молекуле варьируют. Вероятно, генетические свойства гибридов проявляются изменениями конформации молекулы из-за различной локализации атомов метильных групп по отношению к плоскости молекулы. Связь между конформацией молекул каротиноидов и их концентрацией не обнаружена.

Ключевые слова: *Zea mays* L., хлорофилл, каротиноиды, гибрид, инбредная линия, спектр комбинационного рассеяния света.

В фотосинтетическом аппарате (ФСА) высших растений содержатся два типа пигментов: хлорофиллы и каротиноиды. Первые представлены двумя видами молекул: хлорофиллом *a* и хлорофиллом *b*, которые выполняют функцию сбора энергии света и ее трансформации в энергию химической связи. Каротиноиды высших растений подразделяют на два больших класса каротинов и ксантофиллов. Каротины представляют собой молекулы тетрацепенов (линейных или циклических), состоящие из углеродного скелета и водорода, а ксантофиллы характеризуются наличием в составе их молекул атома кислорода (виолаксантин, астаксантин, бета-каротин и др.) [11]. Пигменты выполняют три важные функции: сбор световой энергии и передача ее на хлорофилл реакционного центра (РЦ); защитная функция (деактивация триплетного состояния

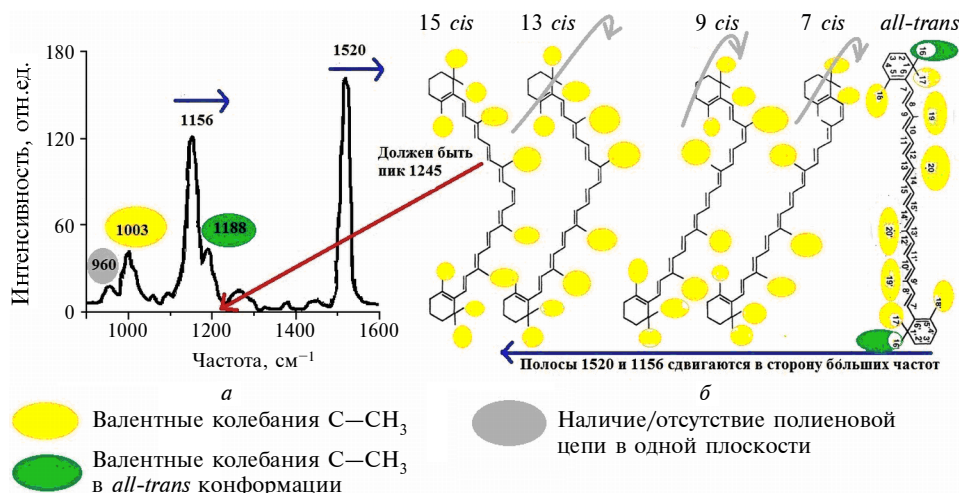


Рис. 1. Спектр комбинационного рассеяния света каротиноидов листьев кукурузы (а) и изомеризация молекулы β -каротина (б)

хлорофилла, утилизация активных форм кислорода и продуктов пероксидного окисления и др.); регулировка вязкости мембраны путем эпоксидации и деэпоксидации ксантрофиллов в мембране тилакоидов [6, 7].

В ФСА каротиноиды содержатся преимущественно в *all-trans*-конфигурации, за исключением реакционного центра, где выявлена *C-15-cis*-конфигурация [8, 10]. Среди методов исследования конфигурации молекул каротиноидов важное место занимает спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС), позволяющая по полосам спектра характеризовать колебания отдельных связей молекулы (рис. 1).

Приведенная схема отражает, каким образом может изменяться вид спектра при изомеризации и какие полосы ответственны за соответствующие колебания. Так, полоса 1520 см^{-1} характеризует валентные колебания двойных $\text{C}=\text{C}$ -связей молекулы каротиноида. Она сдвигается в область высоких частот при изменении конфигурации молекулы каротина из *trans*- в *cis*-положение, причем чем ближе *cis*-положение связи находится к центру молекулы, тем больший ее сдвиг в спектре. Ди-*cis*-конфигурация сдвигает полосу 1520 см^{-1} еще дальше в сторону больших частот [10].

Полоса 1156 см^{-1} характеризует валентные колебания одинарных $\text{C}-\text{C}$ -связей. Одновременный сдвиг полосы 1520 см^{-1} в сторону меньших частот, а полосы 1156 см^{-1} в сторону больших частот может свидетельствовать об уменьшении количества двойных конъюгированных связей в молекуле (как в молекуле полиэтилена). С некоторыми поправками это характерно и для полиеновой цепи молекул каротиноидов. Однако молекулы каротиноидов кроме конъюгированных двойных связей содержат метильные группировки, которые тоже вносят вклад в положение полос [9]. Полоса спектра КРС около 1188 см^{-1} предположительно характеризует изменения положения метила $\text{C}16$ в *all-trans*-конфигурации [5], полоса около 1004 см^{-1} — валентные колебания боковой метильной группы $\text{C}-\text{CH}_3$ [10], около 960 см^{-1} — внеплоскостные колебания $\text{C}-\text{H}$ около $\text{C}-\text{C}$ -связи, причем интенсивность данной полосы возрастает при нарушении плоской конфигурации молекулы. При экстракции каротиноидов ее интенсивность уменьшается, в то время как

интенсивности полос 1520, 1156 и 1004 см^{-1} изменяются незначительно. Роберт [10] показал, что каротиноид, связанный с множеством протеинов в LH II комплексе *Rhodobacter sphaeroides*, характеризуется интенсивной полосой КРС 960 см^{-1} , которая по амплитуде практически не отличается от полос 1156 и 1003 см^{-1} .

Анализом КРС спектров каротиноидов в биологических объектах установлено, что положение полос редко не изменяется, а интенсивность отдельных полос зависит от условий эксперимента или объекта (например, выявляются несколько различных каротиноидов, каротиноидов, взаимодействующих с белками, либо отражаются колебания $\text{C}=\text{C}$ - и $\text{C}=\text{C}=\text{C}$ -связей молекул жирных кислот липидов). Для нормировки вклада отдельных валентных связей молекулы в спектр КРС используют соотношения интенсивностей отдельных полос, выбирая, как правило, постоянную по амплитуде полосу КРС, изменения которой минимальны в данном процессе (внутримолекулярный маркер).

Поскольку содержание пигментов и их состояние в листьях, несомненно, связаны как с продуктивностью, так и с устойчивостью растений к стрессовым воздействиям, исследование пигментного комплекса может оказаться полезным в оценке селекционного материала.

Цель настоящего исследования состояла в установлении различий биологических свойств инбредных линий и гибридов кукурузы с помощью арсенала методических средств, используемых при определении характеристик пигментов.

Методика

Объектом исследования были гибриды (ZP 505, ZP 341, ZP 434) и инбредные линии кукурузы (ML3-3Sdms, ZPPL 225, ZPPL 186), предоставленные Институтом кукурузы (Земун поле, г. Белград, Сербия). Семена проращивали и высаживали в количестве 10 штук каждого генотипа. Проростки выращивали до фазы третьего настоящего листа (14-е сутки) в условиях природного солнечного освещения, 16-часового светового периода при относительной влажности воздуха 75 %. В этом возрасте растений фрагмент третьего настоящего листа использовали для регистрации КРС и определения количества хлорофиллов и каротиноидов.

Количественный пигментный состав исследовали методом абсорбционной спектроскопии (см. рис. 2), который дает возможность измерять коэффициент абсорбции света в характерных максимумах поглощения пигментов (хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов), пропорциональный количественному содержанию пигментов, растворенных в 100 %-м ацетоне [1–4].

Конфигурационные изменения молекул пигментов исследовали методом КРС, состояние каротиноидов гибридов и инбредных линий кукурузы — методом микроКРС на основе микроскопа-спектрометра фирмы Renishaw (UK) с возбуждением $\lambda = 532$ нм. Ровный фрагмент листовой пластинки кукурузы помещали на предметное стекло и записывали его спектр КРС. Сигнал накапливался в течение 10 с при мощности излучения лазера 5 мВт. Получение и первичную обработку спектров КРС производили в программе WIRE, далее их обрабатывали с помощью пакета программ Origin 8.1.

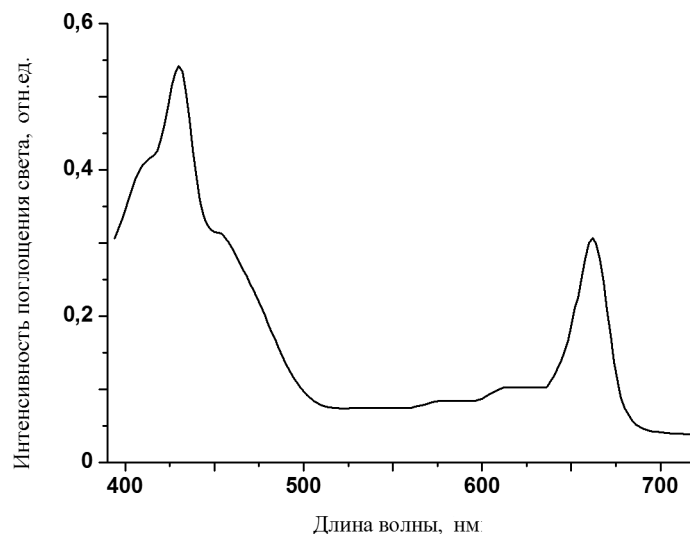


Рис. 2. Спектр поглощения ацетоновой вытяжки из листьев кукурузы

Результаты и обсуждение

Содержание пигментов в листьях инбредных линий кукурузы. Установлено, что максимальное количество хлорофилла (2,73 мг/г сырой ткани) содержится в листьях инбредных линий кукурузы ZPPL 186, а содержание каротиноидов у всех инбредных линий примерно одинаковое (0,40 мг/г сырой ткани) (рис. 3).

Соотношение содержания хлорофиллов *a* и *b* в листьях инбредных линий кукурузы изменялось от 1,93 (ZPPL 225) до 2,31 (ML3-3Sdms). Уменьшение этих соотношений обусловлено повышением содержания хлорофилла *b*, увеличение — повышением содержания хлорофилла *a*. Увеличение этих соотношений может трактоваться как возрастание функциональной активности светособирающих комплексов обеих фотосистем. Соотношение содержаний хлорофиллов и каротиноидов (рис. 4) остается примерно на одном уровне и находится в пределах погрешности определения (6,7—6,9).

Концентрации хлорофиллов варьируют довольно сильно, что может отразиться на фотосинтетической функции инбредных линий, а концентрация каротиноидов изменяется незначительно. В связи с этим интересно проследить, как меняется и зависит ли конфигурация молекул каротиноидов от их концентрации и от содержания хлорофиллов. По-

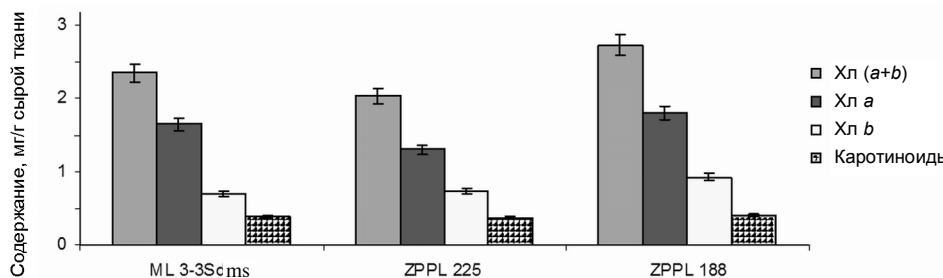


Рис. 3. Количественный пигментный состав листьев инбредных линий кукурузы

СОСТОЯНИЕ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ В ЛИСТЬЯХ

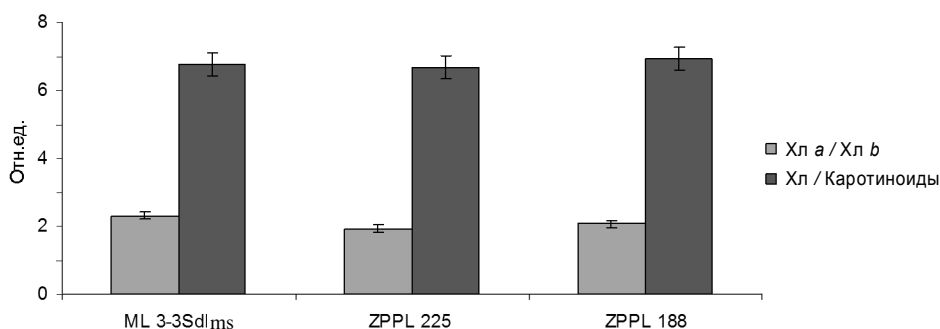


Рис. 4. Соотношение хл *a*/хл *b*, суммы хлорофиллов и каротиноидов в листьях инбредных линий кукурузы

этому в следующей серии экспериментов мы исследовали спектры КРС листьев инбредных линий кукурузы. Конфигурацию молекулы каротина анализировали по пяти полосам спектра КРС: ~960, 1004, 1153, 1188 и 1520 см^{-1} (рис. 5).

Как уже упоминалось, молекулы каротиноидов характеризуются зависимой от межмолекулярных взаимодействий системой сопряженных π -связей. Делокализация π -электронов приводит к тому, что в сопряженной системе валентные связи становятся нецелочисленными (дробными), т.е. ни двойными, ни одинарными. Поэтому и сдвиг, и соотношение интенсивностей полос содержит информацию о конфигурации молекул каротиноидов, а именно: соотношение I_{1520}/I_{1153} характеризует вклад валентных колебаний двойных $\text{C}=\text{C}$ -связей в сравнении с $\text{C}-\text{C}$ -связями и может указывать на изменение длины конъюгированной цепи молекулы и ее конфигурацию. Соотношение интенсивностей полос I_{960}/I_{1004} характеризует переход атомов молекулы из плоской конфигурации в изогнутую. Возрастание этого соотношения указывает на переход молекулы в плоскую конфигурацию [10]. Соотношение интенсивностей полос I_{1004}/I_{1153} характеризует вклад валентных колебаний

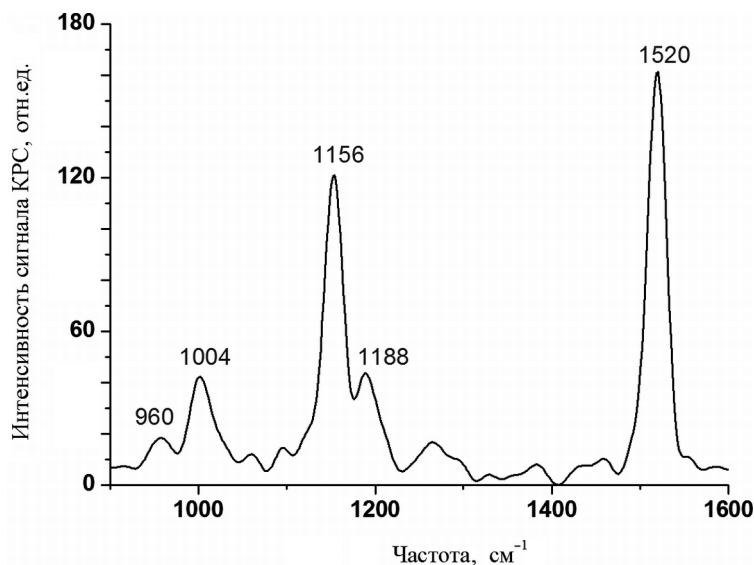


Рис. 5. Спектр комбинационного рассеяния света препарата фрагмента листа кукурузы

связей С–С метильного радикала (СН₃) по отношению к валентным колебаниям одинарных связей =С–С=, соотношение I_{1153}/I_{1190} — вклад валентных колебаний углерода основного углеродного скелета в сравнении с валентными колебаниями метильного радикала в положении С16 в *all-транс*-конфигурации, соотношение I_{1004}/I_{1520} — вклад валентных колебаний связей С–С метильного радикала по отношению к валентным колебаниям связей –С=С–.

Установлено, что соотношение интенсивностей различных полос спектра КРС каротиноидов листа кукурузы зависит от инбредной линии (рис. 6, а, рис. 7, табл. 1). Соотношение I_{1520}/I_{1153} , характеризующее длину полиеновой цепи каротиноидов, варьирует от 1,179 (ML3-3Sdms) до

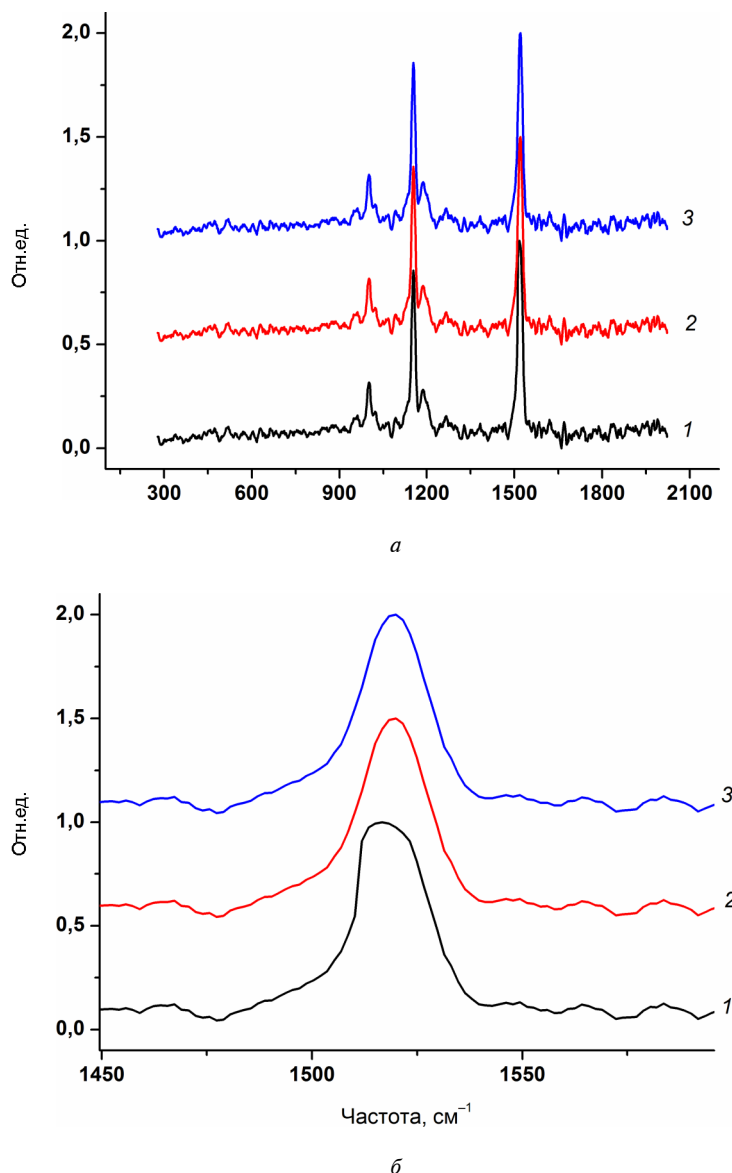


Рис. 6. Спектр комбинационного рассеяния света инбредных линий кукурузы, нормированный по максимальному пику 1520 см⁻¹ (а) и полоса этого спектра 1520 см⁻¹ (б):

1 — ML3-3Sdms; 2 — ZPPL 186; 3 — ZPPL 225

СОСТОЯНИЕ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ В ЛИСТЬЯХ

ТАБЛИЦА 1. Выборка значений пиков спектров комбинационного рассеяния света каротиноидов в листьях гибридных линий кукурузы

Пик, см ⁻¹	Интенсивность пика										Среднее значение	Стандартное отклонение
	71,9	51,9	57,1	54,8	53,4	57,3	53,5	50,7	38,7	56,1		
1002,5	71,9	51,9	57,1	54,8	53,4	57,3	53,5	50,7	38,7	56,1	55,3	2,7
1153,8	220,7	159,4	175,2	168,3	163,8	175,7	164,3	155,5	118,8	172,2	167,4	8,3
1188,1	62,3	45,0	49,5	47,5	46,3	49,6	46,4	43,9	33,6	48,6	47,3	2,3
1520,0	260,3	188,0	206,7	198,5	193,2	207,3	193,8	183,4	140,2	203,1	197,4	9,8
957,6	24,2	17,5	19,2	18,5	18,0	19,3	18,1	17,1	13,1	18,9	18,4	0,9
ZPPL 186												
1002,5	77,5	110,5	98,4	116,3	95,4	92,1	101,5	83,3	92,3	101,7	96,9	3,9
1153,8	238,6	340,0	302,7	357,9	293,8	283,4	312,3	256,5	284,2	313,2	298,3	11,9
1186,4	79,3	113,0	100,6	119,0	97,7	94,2	103,8	85,3	94,5	104,1	99,1	4,0
1520,0	285,6	407,0	362,4	428,5	351,7	339,2	373,8	307,1	340,3	374,9	357,0	14,3
963,9	27,2	38,7	34,5	40,8	33,5	32,3	35,6	29,2	32,4	35,7	34,0	1,4
ZPPL 225												
1000,7	87,1	73,7	75,1	73,6	67,9	54,5	68,0	73,9	66,6	67,8	70,8	2,8
1153,8	241,4	204,3	208,1	204,1	188,2	151,1	188,4	204,7	184,5	187,8	196,3	7,7
1184,7	73,1	61,9	63,0	61,8	57,0	45,8	57,1	62,0	55,9	56,9	59,4	2,3
1520,0	294,0	248,8	253,4	248,6	229,2	184,1	229,5	249,3	224,7	228,8	239,0	9,3
962,1	32,3	27,3	27,8	27,3	25,2	20,2	25,2	27,4	24,7	25,1	26,3	1,0

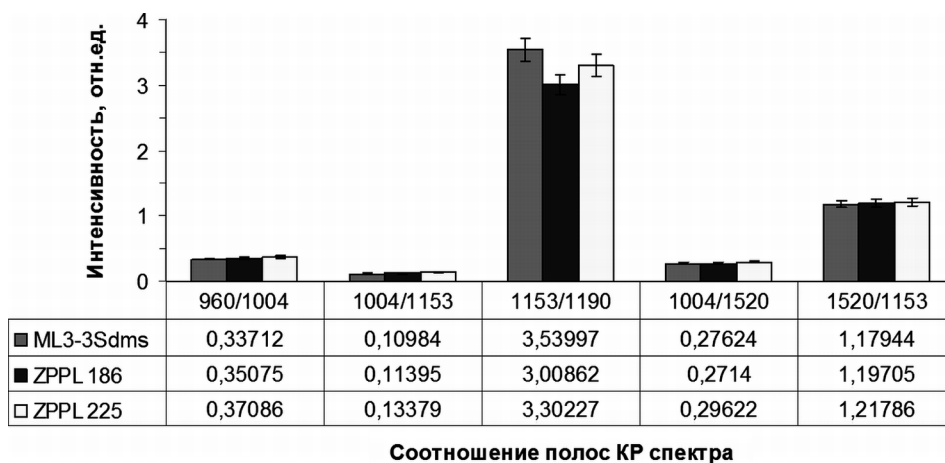


Рис. 7. Соотношение амплитуд полос спектра комбинационного рассеяния света каротиноидов в листьях инбредных линий кукурузы

1,218 (ZPPL 225). Поскольку эти цифры различаются между собой не более, чем на 5 %, говорить об изменении степени конъюгации цепи не приходится. Это предположение подтверждается также и тем, что существенный сдвиг полосы 1520 см^{-1} в сторону меньших частот не наблюдается (рис. 6, б). Однако следует отметить, что тенденция к уменьшению соотношения этих полос и к сдвигу полосы 1520 см^{-1} спектра КРС влево (линия ML3-3Sdms) проявляется достаточно четко, что может свидетельствовать о различной длине или особенностях окружения полиеновой цепи (белки и (или) липиды).

В ходе исследования выявлены существенные изменения валентных колебаний метильной группы (соотношения I_{1004}/I_{1153} , I_{1004}/I_{1520} , I_{1153}/I_{1190}) (рис. 7). Пространственная ориентация атомов в плоскости (I_{960}/I_{1004}) претерпевает незначительные изменения. Выше было показано, что содержание каротиноидов в листовой пластинке разных линий кукурузы постоянно, а конфигурация молекул различается только положением метильных групп. Вероятно, изученные спектры отражают различные популяции каротиноидов преимущественно в одной и той же *all-транс*-конфигурации, поскольку никаких маркеров в области «отпечатков пальцев» ($1200\text{—}1300\text{ см}^{-1}$) не зафиксировано.

Пигментный состав и конформации молекул каротиноидов в листьях гибридов кукурузы. В данной серии экспериментов установлено, что максимальное количество хлорофиллов содержится в листьях гибридов кукурузы ZP 505 и ZP 341 — соответственно 3,00 и 3,32 мг/г сырой ткани, а наибольшее количество каротиноидов — в листьях гибрида ZP 341 — 0,52 мг/г сырой ткани (рис. 8).

Проанализированы соотношения содержания хлорофиллов в листьях гибридов (хл *a*/хл *b*), а также соотношение концентраций суммы хлорофиллов и каротиноидов (хл/каротиноиды) (рис. 9).

Установлено, что соотношение хл *a*/хл *b* у разных гибридов остается постоянным. Это значит, что селекционные изменения генома не затронули функционирование системы биосинтеза хлорофиллов. Соотношение хл/каротиноиды у гибрида ZP 341 близко к 6,7, у ZP 505 — 7,7. Данное соотношение возрастает на фоне снижения концентрации общего хлорофилла (по сравнению с максимальной концентрацией хлоро-

СОСТОЯНИЕ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ В ЛИСТЯХ

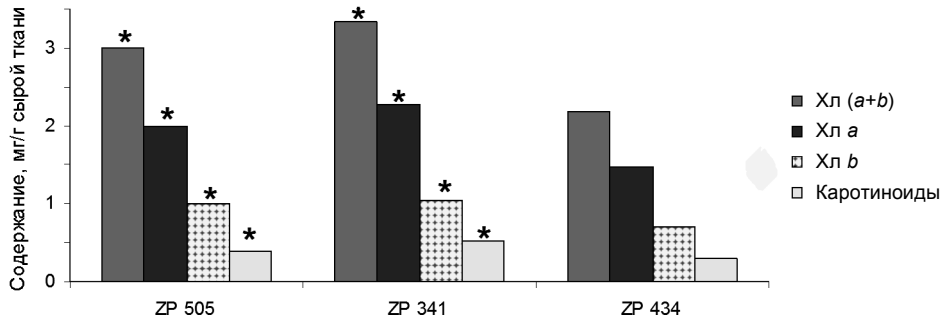


Рис. 8. Содержание пигментов в листьях гибридов кукурузы. Результаты достоверны ($p < 0,05$)

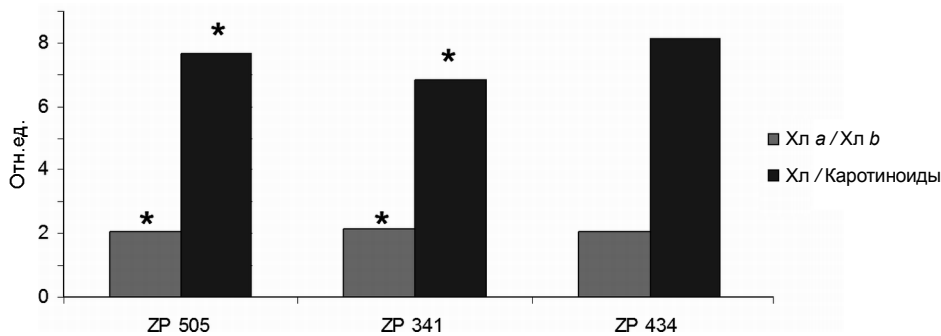


Рис. 9. Изменение соотношений концентраций хл *a*/хл *b*, суммы хлорофиллов и каротиноидов в листьях гибридов кукурузы. Результаты достоверны ($p < 0,05$)

филлов у гибрида ZP 341), при снижении содержания каротина (по сравнению с максимальной концентрацией этого пигмента у гибрида ZP 341).

Как видно из данных, приведенных в табл. 2 и на рис. 10, 11, соотношение I_{1520}/I_{1153} изменяется в пределах 1,184–1,243. Однако, как и у инбредных линий, в каротине гибридов ZP 434 и ZP 505 несколько снижено соотношение I_{1520}/I_{1153} (по сравнению с ZP 341). В этом можно усматривать тенденцию к укорочению полиеновой цепи и некоторому сдвигу максимумов полос (ZP 434 и ZP 505) в сторону меньших частот (рис. 10, б).

Выявлены существенные изменения валентных колебаний метильной группы, что особенно выражено у гибрида ZP 341 (соотношения I_{1004}/I_{1153} , I_{1004}/I_{1520} , I_{1153}/I_{1190}), где обнаружена и максимальная концентрация каротиноидов по сравнению с остальными гибридами. Соотношение I_{960}/I_{1004} у гибрида ZP 434 несколько больше (из-за увеличения амплитуды полосы 960 см^{-1}) по сравнению с другими гибридами (см. рис. 11). Исходя из этих данных, логично предположить, что у гибрида ZP 434 пространственная конфигурация каротиноидов может изменяться в сторону меньшей ориентации каротиноидов в одной плоскости. Как и в опыте с инбредными линиями, маркерные пики *цис*-конфигурации в области «отпечатков пальцев» не появлялись.

Итак установлено, что в инбредных линиях содержание хлорофиллов *a*, *b* и соотношение между ними варьирует. Это, вероятно, связано с различиями в организации светособирающих комплексов фотосистем I и II. У гибридов изменяется концентрация каротиноидов относительно содержания хлорофиллов.

ТАБЛИЦА 2. Выборка значений пиков спектров комбинационного рассеяния света каротиноидов в листьях гибридов кукурузы

Пик, см ⁻¹	Интенсивность пика										Среднее значение	Стандартное отклонение
	ZP 434											
1002,5	121,8	94,0	81,2	97,5	106,1	109,0	97,3	96,8	105,4	105,6	101,5	3,6
1153,8	366,9	283,1	244,6	293,8	319,8	328,4	293,2	291,7	317,7	318,3	305,7	10,8
1186,4	124,2	95,9	82,8	99,5	108,3	111,2	99,3	98,8	107,6	107,8	103,5	3,7
1520,0	434,6	335,3	289,7	348,0	378,8	388,9	347,3	345,5	376,3	377,0	362,1	12,8
960,8	57,2	44,2	38,1	45,8	49,9	51,2	45,7	45,5	49,5	49,6	47,7	1,7
	ZP 505											
1002,5	133,9	104,9	97,6	108,4	113,3	105,9	72,1	92,7	100,1	101,1	103,0	5,2
1153,8	385,4	301,8	281,1	311,9	326,1	304,8	207,5	266,8	291,2	291,2	296,8	15,0
1184,7	138,5	108,5	101,0	112,1	117,2	109,5	74,6	95,9	104,6	104,6	106,7	5,4
1520,0	467,1	365,8	340,6	378,0	395,3	369,4	251,5	323,4	352,9	352,9	359,7	18,2
960,8	46,4	36,3	33,8	37,5	39,3	36,7	25,0	32,1	35,0	35,0	35,7	1,8
	ZP 341											
1153,8	305,7	427,5	411,6	414,1	509,5	391,7	388,2	401,0	403,5	426,9	408,0	16,6
1184,7	87,0	121,7	117,2	117,9	145,1	111,5	110,5	142,2	114,9	121,6	116,2	4,7
1520,0	379,8	531,2	511,5	514,5	633,0	486,7	482,4	498,3	501,3	530,5	506,9	20,6
1002,7	72,3	101,1	97,3	97,9	120,5	92,6	91,8	94,8	95,4	101,0	96,5	3,9
960,8	28,5	39,9	38,4	38,6	47,5	36,5	36,2	37,4	37,7	39,8	38,1	1,5

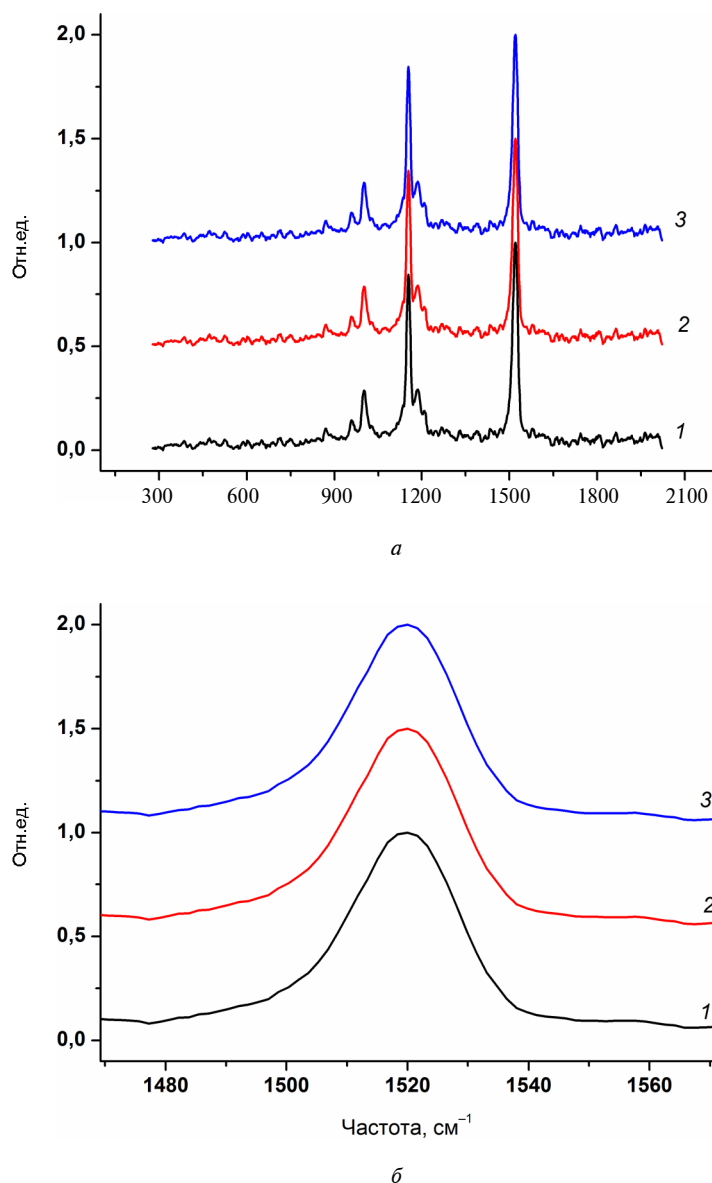


Рис. 10. Спектр комбинационного рассеяния света гибридов кукурузы, нормированный по максимальному пику 1520 см^{-1} (а) и полоса этого спектра 1520 см^{-1} (б):

1 – ZP 434; 2 – ZP 505; 3 – ZP 341

Из данных спектров КРС каротиноидов следует, что конформационные изменения связей —C=C— в молекулах каротиноидов листьев гибридов и инбредных линий кукурузы незначительны. Однако наблюдаются существенные изменения валентных колебаний метильных групп, особенно у гибрида ZP 341, у которого концентрация каротиноидов максимальная. Мы обнаружили также различия в пространственной ориентации молекул каротиноидов в гибридах кукурузы, что подтверждено достоверными различиями соотношений I_{960}/I_{1004} , чего практически не наблюдали у инбредных линий. Что касается стереоизомерии молекул каротиноидов, то различий как между инбредными линиями, так и между гибридами не обнаружено: все молекулы находились преимущественно

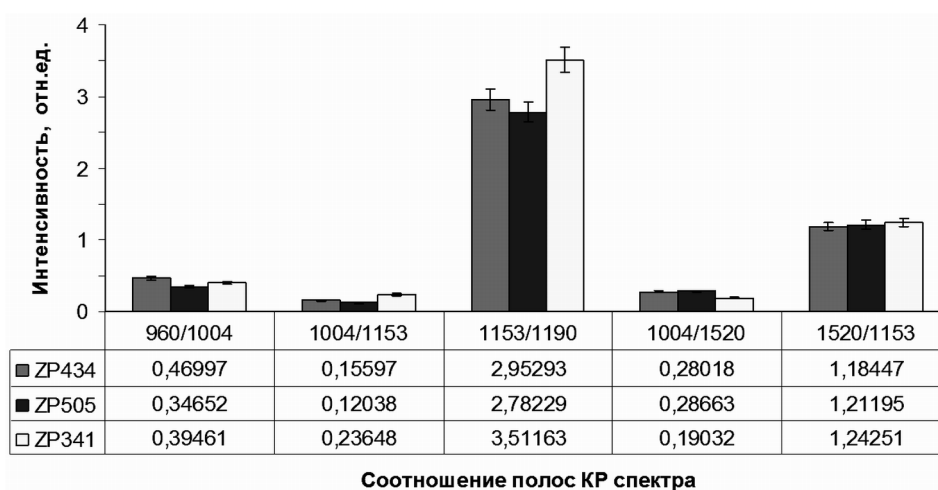


Рис. 11. Соотношение амплитуд полос спектра комбинационного рассеяния света каротиноидов в листьях гибридов кукурузы

но в *транс*-конфигурации, поскольку в спектре КРС не проявляются полосы, характерные для *цис*-изомеров в области «отпечатков пальцев» и сдвиги полос 1520, 1153 см^{-1} незначительны. Связь между концентрацией и конфигурацией молекул пигментов не выявлена. Вероятно, наблюдающиеся различия обусловлены генетическими особенностями исследованных гибридов и инбредных линий.

Полученные результаты характеризуют фотосинтетический аппарат исследованных инбредных линий и гибридов кукурузы с точки зрения стабильности фотосистем, их светособирающих комплексов, а также активности обеих фотосистем, роли циклического и нециклического фотофосфорилирования в общем фотосинтетическом процессе. Эти характеристики селекционного материала могут быть использованы при составлении схем гибридизации кукурузы.

1. Булда О.В., Рассадина В.В., Алексейчук Г.Н., Ламан Н.А. Спектрофотометрический метод определения содержания каротиноидов, ксантофиллов и хлорофиллов в экстрактах семян растений // Методы исследования. — 2008. — 55, № 4. — С. 604–611.
2. Журавская А.Н., Воронов И.В., Поскачина Е.Р. Влияние предпосевного облучения семян амаранта (*Amaranthus* L.) на фотосинтез семенного потомства // Наука и образование. — 2011. — № 4. — С. 65–68.
3. Корнилина В.В. Влияние ложного осинового трутовика (*Phellinus tremulae* Bond et Boriss) на содержание пигментов в листьях осины в лесах Ульяновской области // Биологические науки. Фундаментальные исследования. — 2012. — № 9. — С. 568–572.
4. Шлык А.А. О спектрофотометрическом определении хлорофиллов *a* и *b* // Биохимия. — 1968. — 33, вып. 2. — С. 275–285.
5. Andreeva A., Apostolova I., Velitchkova M. Temperature dependence of resonance Raman spectra of carotenoids // Spectrochimica Acta, part A: Biomolecular Spectroscopy. — 2011. — 78. — P. 1261–1265.
6. Ilioaia C., Johnson M.P., Duffy C.D.P. et al. Origin of absorption changes associated with photoprotective energy dissipation in the absence of zeaxanthin // J. Biol. Chem. — 2011. — 286, N 1. — P. 27247–27254.
7. Jahns P., Latowski D., Strzalka K. Mechanism and regulation of the violaxanthin cycle: The role of antenna proteins and membrane lipids // Biochim. Biophys. Acta. — 2009. — 1787, N 1. — P. 3–14.
8. Koyama Y., Fujii R. Cis-trans carotenoids in photosynthesis: Configurations, excited-state properties and physiological functions // The Photochemistry of Carotenoids. — New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2004. — P. 161–188.

9. *Merlin J.C.* Resonance Raman spectroscopy of carotenoids and carotenoid-containing systems // *Pure & Appl. Chem.* — 1985. — 57, N 5. — P. 785—792.
10. *Robert B.* The electronic structure, stereochemistry and resonance Raman spectroscopy of carotenoids // *The Photochemistry of Carotenoids.* — New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2004. — P. 189—201.
11. *Sajilata M.G., Singhal R.S., Kamat M.Y.* The carotenoid pigment zeaxanthin // *A Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety.* Institute of Food Technologists. — 2008. — 7.

Получено 11.11. 2014

СТАН ФОТОСИНТЕТИЧНИХ ПІГМЕНТІВ У ЛИСТКАХ ІНБРЕДНИХ ЛІНІЙ І ГІБРИДІВ КУКУРУДЗИ

Е.В. Тютяєв¹, В.В. Шутова¹, Г.В. Максимов², Ч.Н. Раденович³, Д.М. Гродзинський⁴

¹Мордовський державний університет ім. Н.П. Огарьова, Саранськ, Росія

²Московський державний університет ім. М.В. Ломоносова, Росія

³Науково-дослідний інститут кукурудзи, Земун поле, Белград, Сербія

⁴Інститут клітинної біології та генетичної інженерії Національної академії наук України, Київ

Досліджували стан фотосинтетичних пігментів у листках інбредних ліній та гібридів кукурудзи. Встановлено, що в інбредних ліній кукурудзи на відміну від гібридів сильно варіює співвідношення хл *a*/хл *b*, однак кількість молекул каротиноїдів, що припадають на одну молекулу хлорофілу, сильно змінюється в гібридів, що практично не характерно для інбредних ліній. Спектроскопією комбінаційного розсіювання світла (КРС) доведено, що каротиноїди в листках як гібридів, так і інбредних ліній знаходяться переважно в *транс*-конфігурації, конформація полієнового ланцюга молекули істотно не змінюється, проте внесок валентних коливань метильних груп (особливо у гібрида ZP 341) і просторова орієнтація атомів у молекулі варіюють. Ймовірно, генетичні властивості гібридів виявляються у змінах конформації молекули через різну локалізацію атомів метильних груп по відношенню до площини молекули. Зв'язку між конформацією молекул каротиноїдів та їх концентрацією не виявлено.

STATE OF PHOTOSYNTHETICAL PIGMENTS IN LEAVES OF INBRED LINES AND HYBRIDS OF MAIZE

E.V. Tyutyayev¹, V.V. Shutova¹, G.V. Maximov², C.N. Radenovic³, D.M. Grodzinskij⁴

¹N.P. Ogarev Mordvinian State University, Saransk, Russia

²M.V. Lomonosov Moscow State University, Russia

³Maize Research Institute, Zemun Polje

¹ Slobodana Bajica, Belgrade, 11185, Republic of Serbia

⁴Institute of Cell Biology and Engineering, National Academy of Sciences of Ukraine

148 Acad. Zabolotnogo St., 03143, Kyiv, Ukraine

It is shown that the ratio Chl *a*/Chl *b* in the inbred lines of maize varies, what is not observed in the hybrids, however the number of molecules of carotenoids per one molecule of chlorophyll varies in hybrids while it little changes in inbreds. With Raman spectroscopy is revealed that the carotenoids in the leaves of hybrids and inbreds are predominantly in the *trans* configuration; significant changes in the conformation of the polyene chain of the molecule does not occur, however the contribution of the valence vibrations of methyl groups (especially in the hybrid ZP 341) and the spatial orientation of the atoms in the molecule vary to a large degree. Possibly the genetic properties of hybrids are shown in conformational changes of the molecule due to the different localization of the atoms of the methyl groups with respect to the plane of the molecule. Relations between molecular conformation of carotenoids and their concentration are not detected.

Key words: *Zea mays* L., chlorophyll, carotenoids, hybrid, inbred line, resonance Raman spectroscopy.