

РАДИАЦИОННАЯ БИОФИЗИКА

УДК 577.3:633.15:631.53:614.875:539.164

ИЗМЕНЕНИЕ КОНФОРМАЦИИ КАРОТИНОИДОВ СЕМЯН ГИБРИДОВ КУКУРУЗЫ ПРИ ДЕЙСТВИИ УЛЬТРАФИОЛЕТА И α -ЧАСТИЦ

© 2020 г. О. В. Слатинская¹, Ч. Н. Раденович², В. В. Шутова³, Г. В. Максимов^{1,4,*}

¹ Биологический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² Maize Research Institute, Zemun Polje – Институт кукурузы “Земун Поле”, Белград, Сербия

³ Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск, Россия

⁴ Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”, Москва, Россия

*E-mail: gmaksimov@mail.ru

Поступила в редакцию 31.05.2018 г.

После доработки 30.10.2019 г.

Принята к публикации 12.02.2020 г.

С помощью спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) исследована роль каротиноидов при облучении (УФВ и α -частицами) семян инбредной линии (zrpl 225) и гибрида (zr 341) кукурузы (*Zea mays* L.). Установлено, что облучение семян в области основания зерна (воздействие α -частиц высоких энергий, но не УФВ) меняет функциональное состояние растения за счет изменения конформации молекулы каротиноидов семян при переходе из 15-*cis* в *all-trans* состояние, а не колебаний С=С и С–С-связей полиеновой цепи молекулы каротиноидов.

Ключевые слова: ультрафиолет зоны В, α -частицы высоких энергий, кукуруза (*Zea mays* L.), гибриды, зерно, комбинационное рассеяние

DOI: 10.31857/S0869803120040104

Одним из способов повышения посевных качеств семян и увеличения скорости прорастания является их предобработка радиацией (от 1 Гр до 10 кГр, мощность дозы 10–900 Гр/ч) или ультрафиолетом (УФ-излучение, в диапазоне 315–380 нм) [1, 2]. Предполагают, что в результате данной технологии в клетках семян синтезируются фенолы и образуются активные формы кислорода (АФК) [3, 4]. Очевидно, что уровень АФК регулируется некоторыми антиоксидантами семян и, в первую очередь, каротиноидами. В связи с этим выявление различий состояния каротиноидов семян при действии физических факторов (свет, температура, радиация и т.д.) важно не только для диагностики функционального состояния семян, но и для разработки технологии формирования новых гибридов. С помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР) было проведено систематическое исследование, свидетельствующее о связи между содержанием и молекулярными свойствами каротиноидов в хлоропластах листа кукурузы при действии на растение радиации и УФ [5]. Показано, что метод КР можно эффективно использовать для исследования конформации молекул каротиноидов семян, оценивая вклад колебаний отдельных связей молекулы (колебаний С=С и С–С-связей полиеновой цепи молекулы; переход атомов молекулы из плоской

конфигурации в изогнутую (искривление молекулы вне плоскости полиеновой цепи); изменение *cis-trans* конформации молекулы) [6].

В данной работе исследовали изменения конформации молекулы каротиноидов семян кукурузы (*Zea mays* L.) чистой линии и гибрида с повышенной всхожестью после локального воздействия ультрафиолетом зоны В (далее – УФВ) и α -частицами высоких энергий (далее – α -частицы).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Объектом исследования служили высокоурожайный гибрид кукурузы с улучшенной всхожестью (*Zea mays* L.) zr341 и чистая линия zrpl225 (линия и гибрид являются собственностью Maize Research Institute, Zemun Polje – Института кукурузы “Земун Поле”, г. Белград, Сербия). Вес семян составлял 281 ± 6 мг и 382 ± 17 мг соответственно. Отметим, что гибрид zr341 обладает высокими показателями качества, урожайности и пригодности к возделыванию [7, 8].

В качестве источника УФВ-излучения использовали ультрафиолетовый облучатель ($\lambda_{\max} = 312$ нм), собранный на основе трех люминесцентных эритемных ламп ЛЭ-30 (мощность 5.2 Вт/м², вклад УФВ-излучения 47.69%) [8–10]. Семена кукурузы фиксировали в пластиковой чашке Петри

и подвергали воздействию УФВ в течение 30, 60 и 90 мин (дозы – 4.46, 8.93 и 13.39 кДж/м² соответственно). В экспериментах с облучением УФВ и α -частицами облучению подвергалось основание зерна кукурузы.

Облучение семян с помощью пучка α -частиц высоких энергий (30 МэВ/нукл) с высоким значением линейной передачи энергии (ЛПЭ) осуществлялось на 120-см циклотроне НИИЯФ МГУ (Р7). Величина ЛПЭ частиц на поверхности объекта после прохождения частиц через 50 мкм алюминиевую фольгу составляла около 26.2 МэВ/нуклон, потери в воздухе (7 см) – около 3 МэВ/нуклон, глубина пробега α -частиц в крахмале – около 1620 мкм (средняя толщина семян 5000–7000 мкм). Так как толщина семени значительно больше длины пробега, будем для упрощения считать, что величина ЛПЭ α -частиц в толщине семян постоянна. Оценка величины поглощенной дозы D в семенах при облучении семян массой M α -частицами с энергией E : D (Гр) = E (Дж)/ M (кг). В соответствии с данными калибровки один отсчет интегратора тока соответствует заряду $Q = 2 \times 10^{-10}$ К, а заряд дейтрона $q = 1.6 \times 10^{-19}$ К. Энергия α -частиц, оставленная в слое семян, составила $E = N \times E_0$, где N – число α -частиц, прошедших через кювету, а $E_0 = 26.2$ МэВ – энергия, оставленная в семенах одной α -частицей. Таким образом, $N = ?$, $E_0 = 1.25 \times 10^9$ дейтронов/отсчет интегратора, а $E = 1.25 \times 10^9 \times 26.2$ МэВ/дейтрон = 32.75×10^9 МэВ/отсчет интегратора, или 52.4 Дж/отсчет интегратора.

Масса слоя семян толщиной 1620 мкм, облучаемая пучком диаметром 3 см (диаметр “окна”), при плотности крахмала 1.5 г/см³ составила 5.72×10^{-3} кг. Тогда D для одного отсчета интегратора составит 9.16 Гр/отсчет интегратора.

Облучение семян проводили в специально изготовленной кольцеобразной кювете с внешним и внутренним диаметром из фигурных колец 60 и 20 мм соответственно. Кювета состояла из двух одинаковых фигурных колец толщиной по 15 мм, соединенных болтами, и уплотняющим тефлоновым кольцом между ними. В центральной части кюветы помещали семена практически вплотную друг к другу в один слой. Кювету помещали на расстоянии 7 см за “окном” ионопровода. Интенсивность пучка частиц поддерживалась постоянной: около 10 отсчетов/с. Расчет энергии α -частиц и поглощенной дозы проводили, считая, что семена полностью состоят из крахмала и заполняют кювету ровным слоем. Облучение семян в кювете было выполнено для 160, 320 и 1600 импульсов интегратора тока, зарегистрированных пересчетным прибором ПС-100. Эти величины импульсов интегратора переводили в поглощенную дозу D . Семена подверглись облучению в дозах 1.5, 3 и 15 кГр [10, 12].

В опыт случайным образом отбирали семена (30 шт.), которые после облучения промывали проточной водой и размещали на фильтровальной бумаге при бесконтактном смачивании водой (при 22°C) до прорастания корешков (длина не менее 5 мм). Далее проростки выращивали в грунте до фазы третьего настоящего листа в условиях 16-часового светового дня при поддержании постоянной температуры 25°C. В качестве контроля использовали необлученные семена, находившиеся в аналогичных условиях. Качество семян оценивали (ГОСТ 13056.6-75) по параметрам всхожести (количество одновременно проросших семян на первый день прорастания – “первичная лабораторная всхожесть семян” и “лабораторная всхожесть” – количество нормально проросших семян на 7-е сутки (ГОСТ 12038-84)) и энергии прорастания (количество семян, проросших и давших корешки, равные половине длины семени) на 3-й день.

Изменения в морфологии корневой системы определяли на 5-й день проращивания семян. Для этого случайным образом отбирали 10 облученных семян и продолжали их выращивать в чашке Петри при бесконтактном смачивании водой на фильтровальной бумаге. В качестве критериев изменения морфологии облученных семян относительно контроля были выбраны такие параметры, как длина главного корня, разветвленность корневой системы, наличие корневых волосков и длина стебля. Изменения в морфологии проростков кукурузы, высаженных в грунт, измеряли на 14-й день после облучения семян по изменению длины и ширины листовой пластинки третьего листа.

Спектры КР регистрировали с помощью КР-спектрометра ДФС 24 с лазером 473 нм (Ciel, Eurobase, Россия), системой регистрации МОРС 1/3648 (Троицк, РФ) на базе линейной ПЗС-матрицы TCD1304DG (Toshiba, Япония) с фильтром LPO2-473RS-50 (Shemrock, США) в течение 10 с; мощность лазера на образце – 3 мВт [4]. Семена кукурузы измельчали и очищали от кукурузного крахмала, гомогенат помещали в кварцевую кювету (толщина поглощающего слоя 10 мм), которую юстировали в держателе КР-спектрометра. Регистрация спектров КР семян проводилась в течение 2 ч после начала эксперимента (облучение семян).

Статистическую обработку данных проводили с применением пакета программ Microsoft Excel 2016 (Microsoft Corporation, США), а спектров КР – с помощью пакета Origin Pro 2017 (OriginLab Corporation, США). Число повторов опытных и контрольных групп (n) было не менее шести.

Таблица 1. Параметры всхожести семян кукурузы после облучения
Table 1. Parameters of germination of corn seeds after irradiation

Доза облучения		Генотип кукурузы	Первичная лабораторная всхожесть, %	Энергия прорастания, %	Лабораторная всхожесть, %
Контроль		zpp1225	30 ± 6	50 ± 5	100 ± 1
		zp341	50 ± 4	87 ± 3	100 ± 0.5
Неионизирующее излучение, кДж/м ²	4.46	zpp1225	80 ± 6	100 ± 0.5	100 ± 0.5
		zp341	80 ± 4	100 ± 0.5	100 ± 0.2
	8.93	zpp1225	40 ± 8	50 ± 6	60 ± 3*
		zp341	50 ± 3	80 ± 4*	100 ± 0.5
	13.39	zpp1225	30 ± 6	90 ± 3*	100 ± 0.2
		zp341	90 ± 2*	100 ± 0.2*	100 ± 0.2
Ионизирующее излучение, кГр	1.5	zpp1225	38 ± 6	75 ± 2	100 ± 3.6
		zp341	100 ± 0.2	100 ± 0.5	100 ± 2
	3	zpp1225	14 ± 3*	71 ± 4*	71 ± 15*
		zp341	100 ± 0.5	100 ± 2	96 ± 8
	15	zpp1225	0*	17 ± 6*	33 ± 10*
		zp341	43 ± 5*	57 ± 8*	57 ± 16*

* Статистически достоверные отличия от контроля, $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе проведенного исследования установлено, что при дозе 15 кГр функциональные параметры семян (первичная лабораторная всхожесть, энергия прорастания и лабораторная всхожесть) достоверно снижаются при дозе 15 кГр для гибрида с улучшенной всхожестью zp341 и при дозе 3 кГр для чистой линии zpp1225. Динамика изменений зависит от генотипа (табл. 1). В первые дни после воздействия на семена УФВ обнаружено снижение скорости роста корешков и стебля (прирост составлял 0.5–1.0 мм), но в дальнейшем скорость роста увеличивалась и зависела от дозы: при 13.39 кДж/м² – до 3.0 ± 0.4 мм в день, при 8.93 кДж/м² – до 4.0 ± 0.5 мм в день и при 4.46 кДж/м² – до 7.0 ± 1.5 мм в день. На 5-й день после воздействия на семена α-частицами и УФВ, при дозах 1.5, 3 кГр и 4.46 кДж/м² корневая система семян имела разветвленную корневую систему из главного корня и придаточных корешков. Отметим, что у образца zp341 после облучения формируются корневые волоски, которые отсутствуют у zpp1225 и семян контрольной группы (табл. 2).

На 14-й день после воздействия на семена УФВ и α-частиц длина третьего настоящего листа растений, высаженных в грунт, имела максимальное значение после облучения в дозах 4.46 кДж/м² и 3 кГр (16.5 ± 1.5 см и 18.0 ± 2.3 см соответственно, в контроле – 12.0 ± 2.5 см). Отметим, что ширина листовой пластинки третьего настоящего листа в среднем на 5 мм уже контроля (табл. 2). При воз-

действии в дозе 15 кГр всхожесть снижается на 80–90%. Так, растения zpp1225 после облучения семями α-частицами в дозе 15 кГр имели слабую скорость роста (максимальная высота растения кукурузы – 5.0 ± 0.5 см, высота растения кукурузы zpp1225 контрольной группы 15.0 ± 2.5 см), либо не развивались после посадки семян в грунт.

Полученные результаты свидетельствуют о зависимости прорастания семян и изменения морфологии корневой системы (табл. 2) проростка от типа излучения: при облучении α-частицами наблюдается интенсивный рост боковых корней (при дозе менее 15 кГр), а при облучении семями УФВ увеличивается интенсивность роста корневой системы. Отметим, что при облучении семями УФВ в дозе 8.93 кДж/м² семена и растения кукурузы развивались хуже относительно контроля.

В связи с поставленной задачей исследования изменений конформации молекулы природного антиоксиданта – каротиноида при прорастании облученных семян нами были зарегистрированы КР-спектры семян и выявлены характерные полосы КР-спектра каротиноидов: ν_1 (960 см⁻¹), ν_2 (1006 см⁻¹), ν_3 (1156 см⁻¹), ν_4 (1190 см⁻¹), ν_5 (1520 см⁻¹) (рис. 1) [3, 5, 6]. Максимальные изменения спектра КР выявлены для соотношений интенсивностей полос I_{1520}/I_{1006} (характеризует вклад валентных колебаний –С=C–связей полиеновой цепи каротиноида), I_{1520}/I_{1160} (характеризует изменение вклада –С=C–связей по отношению к –С–С–связям полиеновой цепи), I_{1006}/I_{960} (характеризует расположение полиеновой цепи каротиноида

Таблица 2. Морфологические показатели проростков семян кукурузы и третьего листа растения кукурузы
Table 2. Morphology of corn seeds and the third leaf of corn plant

Доза облучения	Генотип	Морфология проростков семян ¹				Морфология третьего листа ²		
		длина главного корня, мм	разветвленность корневой системы	наличие корневых волосков	длина стебля, мм	длина листа, мм	ширина листа, мм	
Контроль	zpp1225	23 ± 5	+	–	5	120 ± 25	15 ± 3	
	zp341	31 ± 7	+	–	6	123 ± 22	17 ± 4	
Неионизирующее излучение, кДж/м ²	4.46	zpp1225	45 ± 9	+	–	8	160 ± 20*	12 ± 3*
		zp341	51 ± 11	+	+	20	165 ± 23*	13 ± 3*
	8.93	zpp1225	15 ± 4	–	–	4	96 ± 15*	11 ± 3*
		zp341	8 ± 3	–	–	2	100 ± 18	12 ± 4
	13.39	zpp1225	34 ± 8	+	–	7	166 ± 15	14 ± 3
		zp341	42 ± 12	+	+	15	154 ± 18	15 ± 2
Ионизирующее излучение, кГр	1.5	zpp1225	41 ± 8	+	–	5	151 ± 12	15 ± 3
		zp341	54 ± 12	+	+	18	156 ± 18	12 ± 3
	3	zpp1225	42 ± 9	+	–	5	176 ± 21*	14 ± 3
		zp341	55 ± 13	+	+	15	180 ± 23*	14 ± 3
	15	zpp1225	2 ± 1.5	–	–	–	30 ± 12*	7 ± 2*
		zp341	8 ± 2	–	–	5	60 ± 25*	8 ± 2*

Примечание. ¹ 5-й день после облучения; ² 14-й день после облучения; + и – обозначено наличие либо отсутствие указанного признака.

* Статистически достоверные отличия от контроля, $p < 0.05$.

относительно пиррольных колец). Наличие в спектрах КР пиков на 1190 и 1200 см⁻¹ указывает на состояние каротиноидов, характерное для 15-*cis* конформации. Мы руководствовались известным фактом – интенсивность полос спектра КР пропорциональна количеству каротиноидов в ис-

следуемом образце (при соблюдении одинаковых условий регистрации сигнала в разных точках гомогената семян) [3, 6] и считаем важным указать на наличие изменения количества молекул каротиноидов после облучения семян. Например, значение максимума и интенсивности образца zpp1225 в контроле при положении полосы при 1520 см⁻¹ составляет 1850 отн. ед. После воздействия в дозе в 15 кГр интенсивность полосы составляет 640 отн. ед., что свидетельствует о снижении количества молекул каротиноида, но не является количественной оценкой их содержания в образце.

После воздействия на семена УФВ КР-спектр каротиноидов меняется: наблюдаются рост интенсивности полосы 1190 см⁻¹ и снижение интенсивности полосы 1200 см⁻¹, что свидетельствует о переходе конформации молекулы (и/или состава каротиноидов) из 15-*cis* в *all-trans* состояние [6]. Данный факт согласуется с ростом величины соотношения интенсивностей полос I_{1156}/I_{1190} КР спектра семян после облучения (рис. 2). Отметим, что при УФ-воздействии на семена (от 4.46 до 13.39 кДж/м²) не происходит изменений отношения интенсивности полос 1520 и 1156 см⁻¹ (I_{1520}/I_{1156}) КР-спектра, что свидетельствует об от-

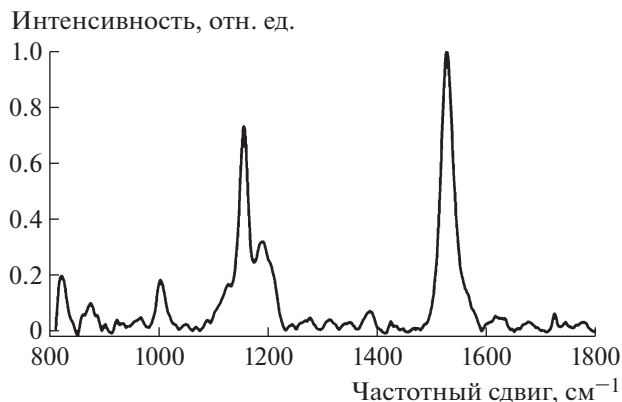


Рис. 1. Спектр комбинационного рассеяния каротиноидов семян кукурузы (нормировано на максимум).

Fig. 1. Raman spectrum of corn seed carotenoids (normalized by maximum).

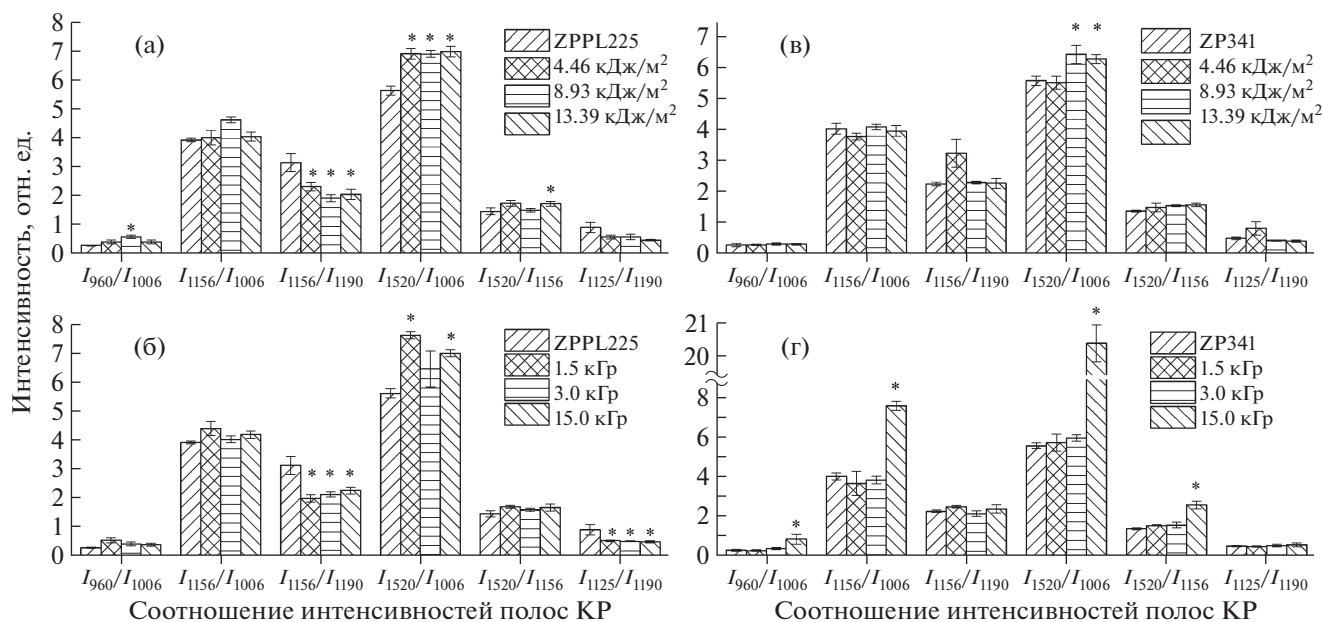


Рис. 2. Соотношение амплитуд полос КР-спектра каротиноидов при облучении семян кукурузы УФВ (а, в) и α -частицами (б, г). * Статистически достоверные отличия от контроля ($p < 0.05$).

Fig. 2. The change in the parameters of the Raman spectrum of carotenoids of maize leaves under UVB irradiation (a, c) and α -irradiation (b, d). * Significant changes relative to control ($p < 0.05$).

сутствии изменений конформации полиеновой цепи молекулы каротиноида.

Облучение семян α -частицами приводит к изменению конформации (или состава) молекулы каротиноида у семян инбредной линии *zprl225* — увеличению доли молекул в *15-cis* конформации, но у гибрида *zpr341* отсутствуют переход молекулы в *cis*-состояние и изменение поворота и длины полиеновой цепи. Установлено, что при облучении семян *zpr341* с дозой 15 кГр интенсивность полос КР-спектра снижается, но возрастает соотношение полос I_{960}/I_{1006} (рис. 2). Вероятно, изменение величины соотношений I_{1520}/I_{1006} и I_{1156}/I_{1006} спектра КР каротиноидов семян при облучении связано с трехкратным уменьшением вклада колебания метильных групп полиеновой цепи каротиноидов (полоса 1006 см^{-1} спектра КР, данные не представлены).

Важно, что соотношение I_{1125}/I_{1190} КР спектра каротиноидов характеризует валентные колебания молекул, связанных с хлорофиллом зародыша в семени [12]. Вероятно, ухудшение функционального состояния семян *zprl225* при облучении α -частицами обусловлено снижением содержания каротиноидов, связанных с хлорофиллом и переходом молекулы из *all-trans* состояния в *15-cis* состояние (соотношения I_{1156}/I_{1190} КР-каротиноидов семян возрастает в 2 раза).

ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведенного исследования показано, что увеличение дозы локального облучения семян УФВ и α -частицами приводит не только к изменению параметров, характеризующих прорастание растения (первичная лабораторная всхожесть, энергия прорастания и лабораторная всхожесть (табл. 1)), но и к различным изменениям конформации молекул каротиноидов семян гибрида и инбредной линии кукурузы (рис. 2).

При локальном облучении семян *zpr341* (15 кГр, пучок α -частиц фокусировали в области семявхода) были выявлены изменения структуры молекулы каротиноидов, о чем свидетельствуют увеличение интенсивности полосы 1006 см^{-1} и рост величины соотношения I_{960}/I_{1006} . Важно, что после облучения α -частицами и УФВ в семенах снижается количество молекул каротиноидов, связанных с хлорофиллом, с чем, вероятно, и связаны изменения в развитии растения. При этом конформация молекулы каротиноида меняется по-разному: облучение α -частицами не оказывает значительное влияние на конформацию (соотношение I_{1156}/I_{1190}), а воздействие УФВ вызывает увеличение доли молекул каротиноида в *all-trans* конформации.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при локальном воздействии УФВ изменения конформации молекул каротиноидов семян могут быть обусловлены накоплением продуктов АФК [12]. Вероятно, семена гибрида, об-

ладающие повышенной всхожестью, обладают большей устойчивостью к действию ионизирующего излучения, чем семена инбредной линии.

ВЫВОДЫ

1. При локальном воздействии на основание семян УФВ (в диапазоне от 5 до 13.39 кДж/м²) и α -частицами (от 1.5 до 3 кГр) возрастают всхожесть и энергия прорастания семян. Семена гибрида с улучшенной всхожестью zp341 обладают большей стимуляцией к прорастанию при воздействии УФВ по сравнению с семенами чистой линии zpr1225.

2. Показано, что воздействие α -частиц вызывает изменение конформации молекулы каротиноидов семян за счет перехода из 15-*cis* в *all-trans* состояние и внеплоскостного поворота полиеновой цепи молекулы каротиноидов, а воздействие УФВ — изменение длины полиеновой цепи молекулы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем глубокую благодарность канд. физ.-мат. наук Андрею Васильевичу Спасскому и д-ру физ.-мат. наук Виктору Михайловичу Лебедеву за оказанное содействие при выполнении данного исследования. Часть этой работы была поддержана фондом РФФ (грант № 19-79-30062) для Г.В. Максимова за отработку метода спектроскопии комбинационного рассеяния на биологических объектах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Корепанов Д.А., Романов В.Ю., Лощенов П.Ю., Богатырёв М.Д.* Влияние длинноволнового УФ облучения на повышение посевных качеств семян *Pinus silvestris* L. // Лесотехн. журн. 2014. Т. 1. № 13. С. 27–29. [*Korepanov D.A., Romanov V.Yu., Loschenov P.Yu., Bogatyrev M.V.* Vliyaniye dlinnovolnovogo UV oblucheniya na povysheniye posevnykh kachestv semyan // Lesotekhnicheskii zhurnal. 2014. V. 1. № 6. P. 27–29. (In Russian)]
2. *Мусина О.Н., Коновалов К.Н.* Радиационная обработка ионизирующим излучением продовольственного сырья и пищевых продуктов // Пищевая пром-сть. 2016. № 8. С. 46–49. [*Musina O.N., Kononov K.N.* Radiacionnaya obrabotka ioniziruyuschim izlucheniem prodovolstvennogo syrya i pischevykh productov // Pischevaya promyshlennost. 2016. № 8. P. 46–49. (In Russian)]
3. *Тютяев Е.В., Шутова В.В., Максимов Г.В. и др.* Состояние фотосинтетических пигментов в листьях инбредных линий и гибридов кукурузы // Физиология растений и генетика. 2015. Т. 47. № 2. С. 147–159. [*Tyutyayev E.V., Shutova V.V., Maksimov G.V. et al.* State of photosynthetic pigments in leaves of inbred lines and hybrids of maize // Fisiologia rasteniy i genetika. 2015. V. 47. № 2. P. 147–159 (In Russian)]
4. *Maksimov G.V., Tyutyayev E.V., Kolmykova T.S., Revin V.V.* Investigation of fluorescence intensity and distribution of wheat leaf on exposure to temperature // Moscow University Biol. Sci. Bull. 2014. V. 69. № 1. P. 6–9.
5. *Slatinskaya O.V., Protopopov F.F., Seifullina N.Kh. et al.* A study of the state of photosynthetic pigments of hybrid maize seeds exposed to ultraviolet and radiation // Biophysics. 2018. V. 63. № 4. P. 611–620.
6. *Кэри П.* Применение спектроскопии КР и РКР в биохимии: Пер. с англ. В. Локшин. М.: Мир, 1985. 272 с. [*Carey P.R.* Biochemical applications of Raman and resonance-Raman spectroscopies. New York, 1982. 272 p.]
7. *Раденович Ч.Н., Максимов Г.В., Тютяев Е.В.* Диагностика конформационных и функциональных свойств зерна элитных инбредных линий кукурузы с помощью инфракрасных спектров // Селекция и семеноводство. 2014. Т. 20. С. 13–33. [*Radenovich Ch.N., Maksimov G.V., Tyutyayev E.V. et al.* Diagnosing conformational and functional characteristics of prestigious maize inbred lines grain using infrared spectra // Selekcija i semenarstvo. 2014. V. 20. P. 13–33. (In Russian)]
8. *Раденович Ч., Филипович М., Бабич М., Анджелкович В. и др.* Селекционные и физико-химические характеристики у инбредных линий и высокопродуктивных гибридов кукурузы с эффективными фотосинтетическими функциями // Сельскохозяйств. биол. 2013. № 1. С. 78–86. [*Radenović Č., Filipović M., Babić M., Anđelković V., et al.* Breeding, physical and chemical features of maize inbred lines and hybrids with significant breeding traits and efficient photosynthetic functions // Agricultural Biol. 2013. № 1. P. 78–86. (In Russian)]
9. *Akhalaya M.Ya., Goncharenko E.N., Baizhumanov A.A.* Effect of ultraviolet B irradiation on immobilization stress-induced changes in the protective systems of C57Bl/6 mice // Bull. Experim. Biol. Med. 2006. V. 141. № 2. P. 219–222.
10. *Лебедев В.М., Максимов Г.В., Максимов Е.Г. и др.* Использование 120-м циклотрона для исследования одновременного воздействия ионизирующего излучения и гипомангнитных условий на простейшие биологические объекты // Изв. РАН. Сер. физ. 2014. Т. 78. № 7. С. 842–845. [*Lebedev V.M., Maksimov G.V., Maksimov E.G. et al.* Ispolzovanie 120-m ciclotrona dlya issledovaniya odnovernennogo vozdeystviya ioniziruyushogo izlucheniya i gipomagnitnykh polyey na prosteyshie biologicheskie obekty // Bull. Rus. Acad. Sci. The series is physical. 2014. V. 78. № 7. P. 842–845. (In Russian)]
11. *Дубров А.П.* Действие ультрафиолетовой радиации на растения. М.: АН СССР, 1963. 124 с. [*Dubrov A.P.* The effect of ultraviolet radiation on plants. M.: AN USSR, 1963. 124 p. (In Russian)]
12. *Klementiev K.E., Maksimov E.G., Gvozdev D.A. et al.* Radioprotective role of cyanobacterial phycobiosomes // Biochim. Biophys. Acta. Bioenergetics. 2019. V. 1860. № 2. P. 121–128.
13. *Hashimoto H., Koyama Y.* The 21A-g state of a carotenoid bound to spinach chloroplast as revealed by picosecond transient Raman spectroscopy // Biochim. Biophys. Acta. Bioenergetics. 1990. V. 1017. № 2. P. 181–186.

The Changes of the Seed Carotenoids in the Corn Hybrids during Ultraviolet Radiation and Radiation Actions

O. V. Slatinskaya^a, Ch. N. Radenivich^b, V. V. Shoutova^c, and G. V. Maksimov^{a,d,#}

^a Faculty of Biology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

^b Maize Research Institute, Zemun Polje, Belgrade, Serbia

^c National Research Mordovia State University, Republic of Mordovia, Saransk, Russia

^d Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National Research Technological University "MISiS", Moscow, Russia

#E-mail: gmaksimov@mail.ru

Using Raman spectroscopy the role of carotenoids in irradiation (UV and α -particles) of inbred line seeds (zpl 225) and maize hybrid (zp 341) (*Zea mays* L.) has been investigated. It has been found that irradiation of seeds in the grain base region (exposure to α -particles of high energies, but not UV) changes the functional state of the plant, by changing the conformation of the carotenoid molecule of the seeds upon transition from the 15-cis to the all-trans state, rather than fluctuations of the C = C and C–C bonds of the polyene chain of the carotenoid molecule.

Keywords: Ultraviolet radiation, alpha particles, carotenoid, *Zea mays* L., hybrids, corn, Raman spectroscopy