

ДИАГНОСТИЦИРОВАНИЕ КОНФОРМАЦИОННЫХ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ЗЕРНА ЭЛИТНЫХ ИНБРЕДНЫХ ЛИНИЙ КУКУРУЗЫ С ПОМОЩЬЮ ИНФРАКРАСНЫХ СПЕКТРОВ

Чедомир Н. Раденович^{1, 2 *}, Георгие В. Максимов³, Евгений В. Тютяев⁴, Виталина Викторвна Шутова⁴, Ненад С. Делич¹, Миле Д. Сечански¹, Александар С. Попович¹

Резюме

В этой работе рассматривается применение методов инфракрасной спектроскопии при исследовании зерна инбредных линий кукурузы для выявления его конформационных и функциональных свойств. В ходе исследования зарегистрированы инфракрасные спектры зерна инбредных линий кукурузы ZPPL 186, ZPPL 225 и M1-3-3 Sdms. Установлено, что в инфракрасных спектрах существуют разные спектральные полосы, отличающиеся по количеству, интенсивности, форме, по частоте колебаний и по кинетике. Эти спектральные полосы характеризуются интенсивностью поглощения инфракрасного излучения и частотой колебания химических связей следующих функциональных групп: алканов, алкенов, алкинов, спиртов, эфиров, нитрилов, карбоксильной кислоты, эстров, альдегидов и кетонов, характерных для биогенных соединений в составе углеводов, витаминов, пигментов и диетических волокон. Анализируя спектральные полосы возможно выявить конформационные и функциональные свойства биогенных соединений в зерне испытуемых инбредных линий кукурузы.

Ключевые слова: Инбредные линии кукурузы, зерно, фотосинтетическая модель, конформационные свойства молекул, инфракрасные спектры, спектральные полосы.

1 Оригинальная научная работа (Originalni naučni rad)

1 Раденович Ч.*, Попович А. Делич Н. Сечански М., Институт кукурузы «Земун Поле», Белград, Сербия

2 Раденович Ч.*, Факультет физической химии Белградского Университета, Белград, Сербия

3 Максимов Г., Биологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

4 Тютяев В., Виталина Викторвна Шутова, Факультет биотехнологии и биологии Национально-исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П.Огарёва, Республика Мордовия, г. Саранск, Россия

*e-mail: * radenovic@sbb.rs; gmaximov@mail.ru

Введение

В настоящее время с помощью современных методов спектроскопии и биотехнологии наблюдается существенный прорыв в диагностике состояния органов и жизненных функций целых растений на молекулярном уровне. Колебательные спектроскопии (инфракрасная и Раман-спектроскопия) являются неизбежным методом анализа органических соединений. Анализом инфракрасных спектров возможно выявить ряд данных о свойствах исследуемых систем (Ribnikar, 1985; Krimm and Bandekar, 1986; Vasilev, 2007; Tarasevich, 2012 и Sverdlov, 1970).

В наших ранних научных работах (Radenovic et al, 1994a, 1994b, 1995 и 1998) исследованы изменения структуры молекул каротиноидов в зерне различных гибридов и инбредных линий кукурузы и показано, что структура этих молекул может служить молекулярным маркером для оценки агрономической эффективности линий и гибридов кукурузы.

В настоящей работе использован метод инфракрасной (ИК) спектроскопии для молекулярной диагностики состояния биогенных соединений и жизненных функций зерна исследуемых инбредных линий кукурузы. Известно, что метод инфракрасной спектроскопии позволяет исследовать молекулярный состав и конформацию молекул, регистрируя интенсивность поглощения инфракрасного излучения в зависимости от частоты валентных и деформационных колебаний молекулярных связей (Vasilev, 2007 и Tarasevich, 2012).

Целью настоящей работы является разработка методологии регистрации и анализа ИК-спектров зерна исследуемых инбредных линий кукурузы, позволяющей выявить конформационные и функциональные

свойства биогенных соединений в зерне.

Материалы и методы Растительный материал.

Материалом исследования послужило зерно трех элитных инбредных линий кукурузы ZPPL 186, ZPPL 225 и M1-3-3 Sdms, селекцион-но-выведенных в Институте кукурузы «Земун Поле», г. Белград, Республика Сербия. Так как речь идет о элитных инбредных линиях кукурузы, то в настоящей работе их свойства и характеристики будут представлены особо и более широко. С элитными линиями выведено более 20-и гибридов кукурузы, среди которых особенно выделяются ZP 341, ZP 360, ZP 434, ZP 544, ZP 633, ZP 735 и ZP 737. Этими гибридами ежегодно засеваются свыше двух миллионов гектар. Кроме Сербии, эти гибриды признаны в России и еще в пяти странах Европы.

Методы.

Всеобъемлющие исследования элитных инбредных линий кукурузы охватывали несколько серий экспериментов, в которых использовались как новые методы (см. пункт 1), так и стандартные методы и поступки (см. пункты 2-4).

1. Метод инфракрасной спектроскопии зерна инбредных линий кукурузы

Спектрофотометры, использующиеся в инфракрасной области спектра, в принципе, не отличаются от спектрофотометров, использующихся в видимой и ультра-фиолетовой областях. Однако, специфика ИК-излучения, особенно в средних и далеких областях спектров, все-таки вызывает некоторые отличия (RIBNIKAR,

1985; VASILEV, 2007), а это, прежде всего, природа и энергия ИК-излучения, природа материала, источники инфракрасного излучения, применение термальных детекторов и другие отличия (Рис.1).

В настоящее время намного чаще применяют особый вид спектрофотометров, которые основываются на принципе

интерферометра. Они не регистрируют непосредственно сам спектр, а интерферограмму, которая впоследствии обрабатывается на ЭВМ и преобразуется в обычную (стандартную) форму спектра. Этот процесс называется Фурьеровой трансформацией, а отсюда и название Fourier Transform Spectroscopy (FTS) – спектроскопия с Фурье

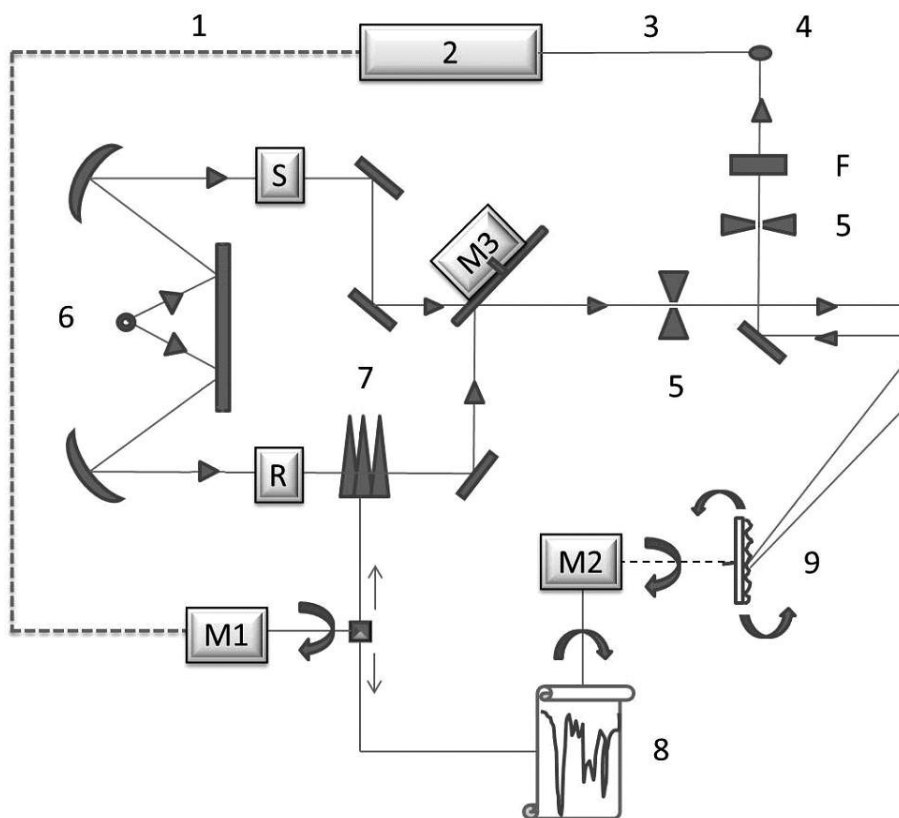


Рис. 1. Блок-схема принципа работы двухлучевого инфракрасного спектрофотометра с оптической решеткой

Sl. 1. Blok shema principa rada infracrvenog spektrofotometra sa dva infracrvena zraka i optičkom rešetkom
 1-сигнал 50 Гц, 2- усилитель, 3-сигнал 10 Гц, 4-детектор ИК-излучения, 5-щель, 6-источник ИК-излучения, 7- фотометрический клин, 8-самописец, 9-решетка, S-проба исследуемого вещества, R-референсная субстанция, M₁-сервомотор одновременного движения фотометрического клина и пера самописца, M₂-мотор вращения решетки и барабана самописца, M₃-мотор вращения секторного зеркала, F-фильтр. (Репродуцировано из: RIBNIKAR, 1985).

преобразователями. Такие аппараты особенно пригодны для анализов в далекой инфракрасной области и отличаются высокой разрешающей способностью.

Для регистрации инфракрасных спектров зерна исследуемых инбредных линий кукурузы, нами использовался ИК-спектроскоп с Фурье преобразователем фирмы Shimadzu IR-Prestige 21, в диапазоне от 400 см⁻¹ до 4000 см⁻¹ (Instruction Manual User System Guide IR-Prestige 21 Shimadzu Fourier Transform Infrared Spectrophotometer). При подготовке проб для регистрации ИК-спектров, зерно гомогенизировали и закатывали в таблетку с бромидом калия (KBr).

2. Химический состав зерна инбредных линий кукурузы

Методы, которые использовались при исследовании химического состава зерна инбредных линий кукурузы, являются общепризнанными и стандартными. Более детально эти методы описаны в работах (RADOSAVLJEVIC et al., 2000; WHITE and JOHNSON, 2003; RADENOVIC et al., 2010).

3. Величина угла и листовая поверхность инбредных линий кукурузы

Третья серия экспериментов касалась испытаний вертикально стоящих верхних листьев инбредных линий кукурузы. С помощью специально сконструированного угломера проведено измерение величины угла между первым надпочатковым листом и стеблем инбредной линии кукурузы. Для измерения листовой поверхности использовался аппарат Portable area meter, модель LI-3000 ("LI-COR Biosciences", USA). Величина угла между первым надпочатковым листом и стеблем и величина листовой поверхности измерялись в течение трех лет

на 120 растениях для каждой инбредной линии. Все методические поступки описаны в предыдущих опубликованных работах (Radenovic et al., 2009; Radenovic et al., 2010).

4. Детальный обзор селекционных, семеноводческих и технологических характеристик инбредных линий кукурузы

Так как речь идет об элитных инбредных линиях кукурузы с эффективным фото-синтезом, в настоящей работе постараемся дать более широкий обзор их релевантных селекционных, семеноводческих и технологических свойств, характеристик и параметров, полученных стандартными методами классификации.

Результаты исследований и их обсуждение

1. Инфракрасные спектры зерна испытуемых инбредных линий кукурузы

Зерно трех испытуемых инбредных линий кукурузы ZPPL 186, ZPPL 225 и M1-3-3 Sdms, после гомогенизации и закатывания в таблетку с бромидом калия (KBr), было готово к регистрации инфракрасного спектра. Нами было зарегистрировано большое количество ИК-спектров. В этой работе на Рис.2-4 представлено по одному спектру для каждой инбредной линии.

На рисунках 2-4 видно, что спектральные данные записываются как зависимость поглощения (пропускания) от длины волны или частоты в обратных сантиметрах (1/см, см⁻¹) на абсцисной оси спектров. Интенсивность поглощения на оси ординат спектра находится в интервале от 0 до 1 в абсолютных единицах (a.e.), т.е. в интервале от 0 до 100 в процентах (%). Все спектральные полосы, зарегистрированные

нами используемым инфракрасным спектроскопом, находятся в интервале от 400 см⁻¹ до 4000 см⁻¹ волнового числа.

При рассмотрении всех 3-х спектров (Рис.2 - Рис.4) было замечено существование около 22 - 24-х спектральных полос в диапазоне волновых чисел от 400 см⁻¹ до 4000 см⁻¹. Спектральные полосы отличаются неодинаковой интенсивностью, неодинаковой кинетикой и неодинаковой шириной в основании. Наиболее интенсивно выраженных спектральных полос насчитывается от 5 до 6-и, средневыраженных от 8-и до 10-и, а весьма слабовыраженных спектральных полос насчитывается от 4-х до 5-и. Существует и несколько спектральных полос, которые невозможно расставить, что свидетельствует о неустойчивом состоянии системы.

Описанные спектральные полосы получены нашим ИК-спектроскопом, где представлена интенсивность поглощения инфракрасного излучения в зависимости от частоты валентных и деформационных колебаний химических связей многочисленных функциональных групп из состава биогенных органических молекул, витамин, пигментов и диетических волокон. Анализом характерных спектральных полос и их сравнением, сначала со спектральными полосами из стандартной библиотеки полос, полученных при эталонных ИК-испытаниях особо чистых органических веществ, а потом с полосами, полученными в ходе испытания органических, природных и многоатомных соединений, описанными в литературе (Vasilev, 2007; Tarasevich, 2012 и Sverdlov, 1970), или в литературе (Vollhardt

& Schore, 1996), возможно с определенной вероятностью выявить химический состав и молекулярную структуру зерна трех испытуемых гибридов кукурузы. Кроме в использованной нами литературе, ИК-спектры (их около 150 тыс.) описаны в ASTM (The American Society for Testing and Materials) библиотеке.

1.1. Инфракрасный спектр зерна инбредной линии кукурузы ZPPL 186

На рис.2 показан ИК-спектр зерна инбредной линии кукурузы ZPPL 186. Этот спектр характеризуется шестью весьма значимыми спектральными полосами с волновыми числами 3400, 1000, 2900, 1700, 1175 и 2375 см⁻¹. Здесь также ясно выражены и спектральные полосы с волновыми числами 2850, 1775, 1450, 1550, 900, 850, 750, 700, 650 и 550 см⁻¹. При детальном рассмотрении спектра находим и слабовыраженные полосы с волновыми числами 3750, 1350, 1225, 1075 и 3085 см⁻¹. В диапазоне волновых чисел от 400 см⁻¹ до 4000 см⁻¹ намечается неустойчивое состояние системы с волновыми числами 3900, 1875 и 650 см⁻¹.

1.2. Инфракрасный спектр зерна инбредной линии кукурузы ZPPL 225

На рис.3 показан ИК-спектр зерна инбредной линии кукурузы ZPPL 225. Этот спектр характеризуется шестью весьма значимыми спектральными полосами с волновыми числами 3400, 1000, 1675, 2925, 2375 и 1175 см⁻¹. Здесь также ясно выражены и спектральные полосы с волновыми числами 1475, 1100, 1750, 2850, 1500, 1100, 925, 875, 775, 700 и 575 см⁻¹. При детальном рас-

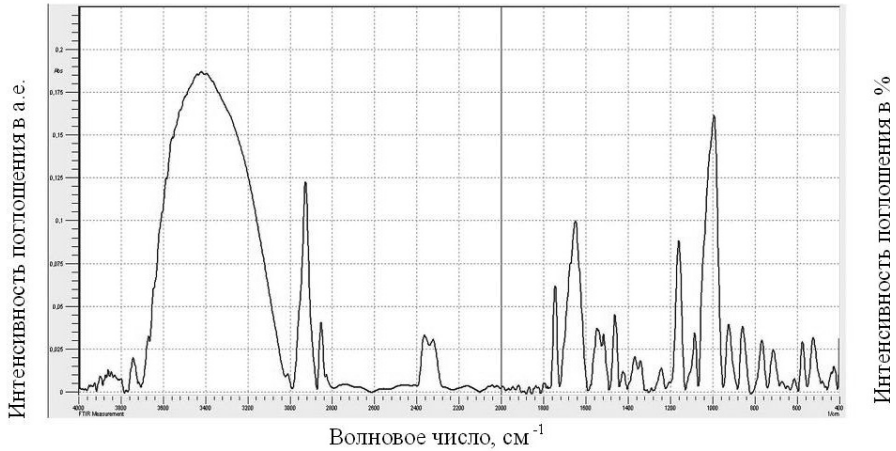


Рис. 2 Один из ИК-спектров зерна инбредной линии кукурузы ZPPL 186
Sl. 2 Jedan od infracrvenih spektara inbred linije kukuruza ZPPL 186

смотрении спектра находим и слабо выраженные полосы с волновыми числами 3250, 1275, 2850, 700 и 1225 см^{-1} . В диапазоне волновых чисел от 400 см^{-1} до 4000 см^{-1} намечается неустойчивое состояние системы с волновыми числами 3850, 850, 1375 и 675 см^{-1} .

1.3. Инфракрасный спектр зерна инбредной линии кукурузы M1-3-3 Sdms

На рис.4 показан ИК-спектр зерна инбредной линии кукурузы M1-3-3 Sdms. Этот спектр характеризуется пятью весьма значимыми спектральными полосами с волновыми числами 3400, 1000, 1650, 2950 и 1175 см^{-1} . При детальном рассмотрении спектра находим и слабо выраженные полосы с волновыми числами 1100, 1750, 1450, 950, 850, 775, 700 и 2850 см^{-1} . В диапазоне

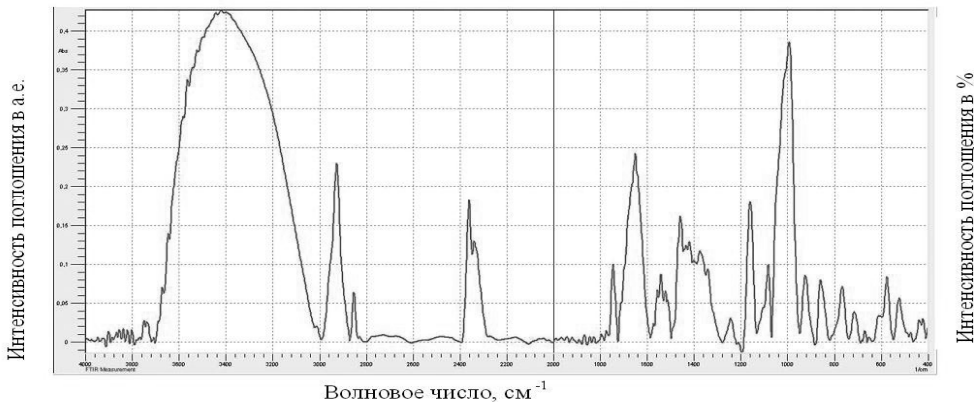


Рис. 3 Один из ИК-спектров зерна инбредной линии кукурузы ZPPL 225
Sl. 3 Jedan od infracrvenih spektara inbred linije kukuruza ZPPL 225

волновых чисел от 400 см^{-1} до 4000 см^{-1} намечается неустойчивое состояние системы с волновыми числами 3900, 2350 и 1900 см^{-1} .

В ходе проведенного исследования, из каждого спектра инбредных линий кукурузы ZPPL 186, ZPPL 225 и M1-3-3 Sdms (Рис.2-4) выбрано по 5-6 наиболее выра-

женных спектральных полос. Мы анализировали эти спектральные полосы, чтобы выявить валентные симметричные и ассиметричные колебания С–Н группы, а также деформационные колебания С–Н групп. Мы пытались выявить и колебания C_{sp^2} -Н связей **алкенов**, валентные колебания S–O, С–Р, С–S связей, валентные колебания С=О свя-

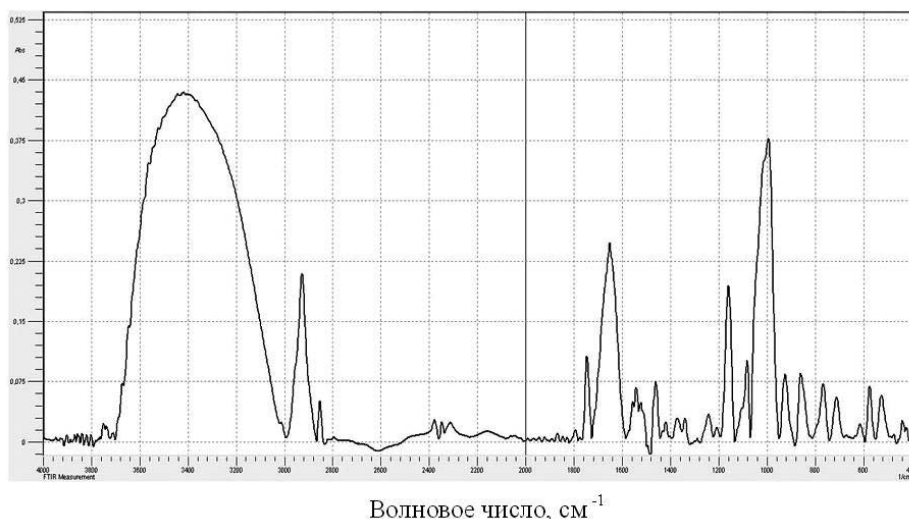


Рис. 4 Один из ИК-спектров зерна инбредной линии кукурузы M1-3-3 Sdms
Sl. 4 Jedan od infracrvenih spektara inbred linije kukuruza M1-3-3 Sdms

зей **альдегидов** и **кетонов**, O–H связей вторичных и третичных **спиртов**.

2. Химический состав зерна элитных инбредных линий кукурузы

Результаты наших исследований химического состава зерна касаются важных химических составляющих. Результаты объединенных исследований химического состава зерна испытуемых инбредных линий кукурузы даны в Табл.1,

Табл.2 и Табл.3. Эти результаты дополнены и результатами исследований витаминного и диетического состава зерна, а также и результатами исследований биогенных веществ в составе зерна.

3. Величина угла наклона первого надпочаточного листа и величина листовой поверхности инбредных линий кукурузы

Результаты измерений величины

угла между первым надпочаточным листом и стеблем, а также результаты измерений листовой поверхности даны в Табл. 4. Эти результаты показывают, что изучаемые элитные инбредные линии кукурузы относятся к группе самых современных инбредных линий с вертикально стоящими верхними листьями, отличающиеся и

Таблица 1. Результаты анализа химического состава зерна инбредных линий кукурузы
Tabela 1. Rezultati analize hemijskog sastava zrna inbred linija kukuruza

Химический состав зерна	Диапазон хим. состава*	Среднее значение*	Среднее значение химического состава зерна:		
			ZPPL 186	ZPPL 225	M1-3-3 Sdms
Влажность (%)	7-23	16,0	10,24	8,64	8,78
Крахмал (%)	61-78	71,7	67,80	64,22	65,52
Протеины (%)	6-12	9,5	10,22	11,33	12,44
Жиры (масло) (%)	1,0-5,7	4,3	7,53	6,96	7,14
Пепел (%)	1,1-3,9	1,4	1,48	1,47	1,43
Пентоза (моносахариды с 5-ю углеводородными атомами, рибоза и дезоксирибоза) (%)	5,8-6,6	6,2	-	-	-
Волокна (%)	8,3-11,9	9,5	-	-	-
Целлюлоза + лигнин (%)	3,3-4,3	3,3	-	-	-
Суммарный сахар (в виде глюкозы) (%)	1,0-3,0	2,6	-	-	-
Суммарные каротиноиды (мг/кг)	12-36	26,0	-	-	-

* Репродуцировано из: (WHITE and JOHNSON, 2003)

ДИАГНОСТИЦИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ЗЕРНА КУКУРУЗЫ 13-31

Таблица 2. Витаминный состав зерна инбредных линий кукурузы
Tabela 2. Vitaminski sastav zrna inbred linija kukuruza

Химический состав зерна	Диапазон химического состава*	Среднее значение*
Витамин А, мг/кг	-	2,50
Витамин Е, МЕ/кг	17-47	30,00
Тиамин, мг/кг	3,0-8,6	3,80
Рибофлавин, мг/кг	0,25-5,60	1,40
Пантотеновая кислота, мг/кг	3,5-14,0	6,60
Биотин, мг/кг	-	0,08
Фолиевая кислота, мг/кг	-	0,30
Холин, мг/кг	-	576,00
Ниацин, мг/кг	9,3-70,0	28,00
Пиридоксин, мг/кг	-	5,30

* Репродуцировано из: (WHITE and JOHNSON, 2003)

Таблица 3. Результаты анализа химического состава диетических волокон в целом зерне и в структурных компонентах зерна инбредных линий кукурузы*
Tabela 3. Rezultati analize hemijskog sastava dijetetskih vlakana u celom zrnu i u strukturnim komponentama zrna inbred linija kukuruza*

Структурные компоненты целого зерна	Целое зерно	Крахмал. эндосперм	Алейрон. эндосперм	Зародыш	Перикарпий	Верх зародыша
Процент сухой материи	100	81,0	2,0	11,0	5,3	0,8
Волокна, нерастворимые в нейтральном детергенте (%)	9,5	1,0	50	11,0	90	95
Гемицеллюлоза (%)	6,7	-	-	18	67	70
Целлюлоза (%)	3,0	-	-	7,0	23	-
Лигнин (%)	0,2	-	-	1,0	0,1	2,0
Растворимые волокна (%)	0,1	0,5	25	3,0	0,2	-
Тотальные волокна (%)	9,5	1,5	75	14	90,7	95
Процент волокон в зерне	100	12,0	15	1,0	51	0,1

* Репродуцировано из: (WHITE and JOHNSON, 2003)

свойством фотосинтетической модели.

4. Обзор селекционных и семеноводческих свойств элитных инбредных линий кукурузы с эффективными фотосинтетическими функциями

В последние пять лет исследуемые элитные инбредные линии кукурузы ZPPL 186, ZPPL 225 и M1-3-3 Sdms весьма широко используются в селекции, поэтому в нас-тоящей работе мы постараемся подчеркнуть их существенные свойства, характеристики и параметры. (Табл. 5).

Табл. 4. Величина угла наклона первого надпочаточного листа и величина листовой поверхности инбредных линий кукурузы с эффективным фотосинтезом

Tbl. 4. Veličina ugla između prvog lista iznad klipa i stabiljike i površina tog lista kod inbred linija sa efikasnom fotosintezom

Инбредная линия кукурузы*	ФАО группа созревания	Гетерозисное происхождение линии*	Угол наклона первого надпочаточного листа к стеблю (°)		Листовая поверхность первого надпочаточного листа (см ²)	
			\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
ZPPL 186	650-700	Земун Поле - BSSS	21,5	1,13	3822	358
ZPPL 225	350-400	Земун Поле - BSSS	23,5	1,18	3686	334
M1-3-3 Sdms	530-560	Земун Поле - BSSS	21,2	1,14	3159	310

* Изучаемые элитные инбредные линии кукурузы представляют собой хорошие гетерозисные пары, отличающиеся высокими комбинационными способностями для урожая зерна, хорошо размножаются и плодородны.

Имея в виду все вышеизложенное, возникают два вопроса:

1) Как выявить отдельные биогенные органические молекулы анализируя характеристики спектральных полос их

функциональных групп?

2) Существует ли разница между инфракрасными спектрами зерна инбредных линий кукурузы ZPPL 186, ZPPL 225 и M1-3-3 Sdms? Если такая разница существует между спектрами, тогда можно прийти к выводу и о разнице

ДИАГНОСТИЦИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ЗЕРНА КУКУРУЗЫ 13-31

Таблица 5. Обзор существенных селекционных и семеноводческих свойств элитных инбредных линий кукурузы с эффективными фотосинтетическими функциями

Tabela 5. Pregled najvažnijih selekcionih i semenarskih svojstava elitnih inbred linija kukuruza sa efikasnim fotosintetičkim funkcijama

№	Селекционно семеноводческие свойства линий кукурузы	Краткий обзор селекционных и семеноводческих свойств инбредных линий кукурузы			
		ZPPL 186	ZPPL 225	M1-3-3 Sdms	
1	Урожай зерна с 14% влажности за нес-колько лет (кг/га)	2100	2100	2320	
2	Процент влажности зерна во время уборки	26,30%	19,62%	19,80%	
3	Число растений по гектару во время уборки	а) без орошения	55000	59000	59000
		б) с орошением	67500	75000	67500
4	Основные характеристики зерна	Полукремнистое зерно с большим содержанием каротиноида	Зубовидное зерно	Зубовидное зерно с большим содержанием каротиноида по краям зерна	
5	Основные характеристики стебля	Стебель средней высоты и эластичный	Стебель низкий, тонкий и эластичный	Стебель средней высоты, прочный и эластичный	
6	Всхожесть линии	Линия обладает хорошей всхожестью	Линия обладает хорошей всхожестью	Линия обладает очень хорошей всхожестью	
7	Ранний рост линии	Линия обладает хорошим ранним ростом	Линия обладает хорошим ранним ростом	Линия обладает хорошим ранним ростом и пригодна для раннего посева	
8	Толерантность линий к высокой густоте посева при соответствующем применении удобрения	У линии ярко выражено <i>Stay green</i> свойство	Линия в меньшей степени проявляет <i>Stay green</i> свойство	Линия пригодна для создания гибридов с умеренной густотой посева	
9	Сохраняемость зеленого цвета листа вплоть до уборки	Линия очень долго сохраняет зеленый цвет, листья остаются зелеными вплоть до физиологической спелости зерна	Листья над початком остаются зелеными вплоть до восковой спелости зерна	У линии умеренно выражено <i>Stay green</i> свойство	
10	Необходимость в специальных условиях выращивания линий?. Оценка устойчивости, толерантности и приспособляемости линий	Для выращивания линии не требуются специальные условия, линия устойчива ко всем важнейшим возбудителям болезни	Для выращивания линии не требуются специальные условия, линия устойчива ко всем возбудителям болезни	Линия хорошо переносит низкие температуры и среднеустойчива к засухе	

№	Селекционно-семеноводческие свойства линий кукурузы	Краткий обзор селекционных и семеноводческих свойств инбредных линий кукурузы		
		ZPPL 186	ZPPL 225	M1-3-3 Sdms
11	Возможность проведения ручной уборки урожая или механизированной уборки урожая	Ручная уборка урожая проводится легко	Ручная уборка урожая проводится легко	Линия пригодна к ручной и механизированной уборке урожая
12	Приспособляемость линий к условиям различных географических районов	Линия весьма пластична и хорошо приспособляется к условиям любого района	Линия весьма пластична и хорошо приспособляется к условиям любого района	Линия весьма пластична и хорошо приспособляется к условиям любого района
13	Пригодность зерна на корм жвачных и нежвачных животных, а также на корм домашних животных-любимцев	Линия с высококачественным зерном, дает гибриды с весьма высококачественным зерном	Линия с высококачественным зерном, дает гибриды с особо качественным зерном, пригодным на корм жвачных и нежвачных животных	Линия пригодна на корм жвачных и нежвачных животных, а также на корм других домашних животных.
14	Устойчивость, толерантность или пластичность линий в условиях засухи	Линия хорошо переносит засуху и высокие температуры	Линия хорошо переносит засуху, повышенные и высокие температуры	Линия неплохо переносит засуху
15	Пригодность линий для создания гибридов кукурузы на зерно и силос	Линия весьма хорошо подходит для создания гибридов на силос	Линия прежде всего предназначена для создания гибридов кукурузы на зерно	Линия пригодна для создания гибридов кукурузы на зерно
16	Крупнота зерна, качество, цвет и характеристики зерна	Полукремнистое зерно средней величины	Зубовидное зерно средней величины с большим количеством антоциана по бокам зерна	Зубовидное зерно, каротиноиды по бокам зерна

структурных характеристик зерна испытываемых инбредных линий кукурузы.

Ответ на поставленные вопросы можно, в значительной мере, получить из данных в Табл. ба, бб, бс, которые представляют собой единое целое.

Рассматривая все колонны Табл. ба, бб, бс и особо обращая внимание на интен-

сивность поглощения у наиболее выраженных спектральных полос, на волновое число, при котором пики этих спектральных полос появляются, на диапазоны волновых чисел, взятых из литературы (Vollhardt & Schore, 1996), а также изучив биогенные органические молекулы (значения интенсивности поглощения инфракрасного излучения и частоты валентных и деформационных колебаний их функциональных

ДИАГНОСТИЦИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ЗЕРНА КУКУРУЗЫ 13-31

Таблица 6а. Конформационные и функциональные свойства биогенных органических молекул зерна инбредных линий кукурузы, выявленные анализом инфракрасных спектральных полос, отражающих интенсивность поглощения инфракрасного излучения (%) и частоту (см^{-1}) валентных и деформационных колебаний молекулярных связей функциональных групп, характерных для биогенных соединений.

Tabela 6a. Konformaciona i funkcionalna svojstva biogenih organskih molekula u zrnu inbrednih linija kukuruza, dijagnostikovana analizom infracrvenih spektralnih traka koje odražavaju intenzitet apsorpcije infracrvenog zračenja (%) i frekvenciju (см^{-1}) valentnih i deformacionih oscilacija molekularnih veza funkcionalnih grupa karakterističnih za biogena jedinjenja.

Инбредная линия кукурузы	Интенсивность поглощения у наиболее выраженных спектральных полос (%)	Волновое число (см^{-1})	Биогенная органическая молекула*
ZPPL 186	81,5	3400 3200-3650* 3250-3500*	спирты амины алкины
	73,0	1000 1000-1260*	спирты эфирь
	58,0	2900 2840-3000* 2500-3300*	алканы карбоксильные кислоты
	50,0	1700 1690-1750*	альдегиды кетонь
	38,0	1175 1000-1260*	спирты эфирь
	36,0	1350 1000-1260*	спирты эфирь эстры

* Репродуцировано из: (VOLLHARDT & SCHORE, 1996)

Таблица 6б. Конформационные и функциональные свойства биогенных органических молекул зерна инбредных линий кукурузы, выявленные анализом инфракрасных спектральных полос, отражающих интенсивность поглощения инфракрасного излучения (%) и частоту (см^{-1}) валентных и деформационных колебаний молекулярных связей функциональных групп, характерных для биогенных соединений.

Tabela 6b. Konformaciona i funkcionalna svojstva biogenih organskih molekula u zrnu inbrednih linija kukuruza, dijagnostikovana analizom infracrvenih spektralnih traka koje odražavaju intenzitet apsorpcije infracrvenog zračenja (%) i frekvenciju (см^{-1}) valentnih i deformacionih oscilacija molekularnih veza funkcionalnih grupa karakterističnih za biogena jedinjenja.

Инбредная линия кукурузы	Интенсивность поглощения у наиболее выраженных спектральных полос (%)	Волновое число (см^{-1})	Биогенная органическая молекула*
ZPPL 225	100	3410	спирты амины алкины
		3200-3650*	
		3250-3500*	
		3260-3330*	
	94,5	1000	спирты эфирь
		1000-1260*	
	53,0	1675	алканы алкены альдегиды кетонь
		1620-1680*	
1690-1750*			
51,0	2925	карбоксильные кислоты алканы	
	2500-3300*		
	2840-3000*		
48,0	2375	алкены нитриль	
	2100-2260*		
	2220-2260*		
39,5	1175	спирты эфирь	
	1000-1260*		

* Репродуцировано из: (VOLLHARDT & SCHORE, 1996)

Таблица 6с. Конформационные и функциональные свойства биогенных органических молекул зерна инбредных линий кукурузы, выявленные анализом инфракрасных спектральных полос, отражающих интенсивность поглощения инфракрасного излучения (%) и частоту (см^{-1}) валентных и деформационных колебаний молекулярных связей функциональных групп, характерных для биогенных соединений.

Tabela 6с. Konformaciona i funkcionalna svojstva biogenih organskih molekula u zrnu inbrednih linija kukuruza, dijagnostikovana analizom infracrvenih spektralnih traka koje odražavaju intenzitet apsorpcije infracrvenog zračenja (%) i frekvenciju (cm^{-1}) valentnih i deformacionih oscilacija molekularnih veza funkcionalnih grupa karakterističnih za biogena jedinjenja.

Инбредная линия кукурузы	Интенсивность поглощения у наиболее выраженных спектральных полос (%)	Волновое число (см^{-1})	Биогенная органическая молекула*
M1-3-3 Sdms	76,5	3400 3200-3650* 3250-3500*	спирты амины
	66,5	1000 1000-1260*	спирты эфиры
	48,5	1650 1620-1680*	алкены
	36,5	2950 2500-3300* 2840-3000*	карбоксильные кислоты алканы
	34,5	1175 1000-1260*	спирты эфиры

* Репродуцировано из: (VOLLHARDT & SCHORE, 1996)

групп), мы выявили конформационные и функциональные характеристики зерна испытуемых инбредных линий кукурузы ZPPL 186, ZPPL 225 и M1-3-3 Sdms.

Сравнивая спектральные полосы, зарегистрированные нашим спектрометром при исследовании органических молекул из зерна испытуемых инбредных линий кукурузы с полосами, полученными в ходе испытания молекул из класса органических соединений, описанных в литературе (Vollhardt & Schore, 1996), мы идентифицировали эти соединения (алканы, алкены, алкины, амины, спирты, эфиры, нитрилы,

эстры, карбоксильные кислоты, альдегиды, кетоны) и в зерне ин-бредных линий кукурузы.

Сравнением всех колонн Табл.6а - Табл.6с по всем параметрам (интенсивность поглощения, волновое число и диапазон волновых чисел), можно прийти к выводу, что между инбредными линиями не существует разница у спектральных полос с волновыми числами 3400, 2950, 2925, 2900, 1175 и 1000 см^{-1} . Однако, между инбредными линиями существует разница у спектральных полос с волновыми числами 2375, 1700, 1675, 1650 и 1350 см^{-1} . Из этого

вытекает, что речь идет о:

1. альдегидах и кетонах (ZPPL 186 на частоте 1700 см^{-1}), а затем о спиртах и эстрах (ZPPL 186 на частоте 1350 см^{-1})
2. алкенах и нитрилах (ZPPL 225 на частоте 2375 см^{-1}), а затем о алканах, альдегидах и кетонах (ZPPL 225 на частоте 1675 см^{-1})
3. алкенах (M1-3-3 Sdms на частоте 1650 см^{-1})

Выводы

Применением метода инфракрасной спектроскопии впервые была проведена регистрация инфракрасных спектров зерна инбредных линий кукурузы ZPPL 186, ZPPL 225 и M1-3-3 Sdms. На основании проведенных испытаний стало возможным утверждать следующее:

- Инфракрасный спектр зерна инбредных линий кукурузы характеризуется спектральными полосами, которых может быть от 22-х до 24-х в диапазоне волновых чисел от 400 см^{-1} до 4000 см^{-1} .
- Спектральные полосы могут быть выражены по-разному (сильно, средне, слабо) и отличаться неодинаковой интенсивностью поглощения (%), неодинаковой кинетикой и неодинаковой шириной в основании.
- Для каждой из испытуемых инбредных линий проанализировано по пять или шесть спектральных полос, каждая со своими данными: интенсивность поглощения в %, экспериментально определенное волновое число в см^{-1} и диапазон

волновых чисел, взятый из литературы. В конце приведены классы органических молекул с их функциональными группами, выявленные в зерне.

- В инфракрасном спектре зерна испытуемых инбредных линий кукурузы, анализом спектральных полос выявлены следующие биогенно-органические молекулы с их функциональными группами: спирты, амины, эфиры, алканы, карбоксильные кислоты, алкены, альдегиды, кетоны, нитрилы и эстры.
- Конформационные и функциональные свойства всех трех испытуемых ин-бредных линий кукурузы в большинстве своем одни и те же.
- Конформационные и функциональные свойства всех трех испытуемых инбредных линий кукурузы отличаются только:

1) в альдегидах и кетонах (ZPPL 186 при 1700 см^{-1}), а затем в спиртах и эстрах (ZPPL 186 при 1350 см^{-1});

2) в алкенах и нитрилах (ZPPL 225 при 2375 см^{-1}), а затем в алканах, альдегидах и кетонах (ZPPL 225 при 1675 см^{-1}) и

3) в алкенах (инбредная линия M1-3-3 Sdms при 1650 см^{-1})

Литература

- Ribnikar, S. (1985): Infracrvena i Ramanska spektroskopija. In.: Fizičko-hemijske metode. Izdavač „Rad“, Beograd, pp. 251-266.
- Instruction Manual. User System Guide “IR-Prestige 21 Shimadzu Fourier Transform

- Infrared Spectrophotometer“, - Ed. Shimadzu Scientific Instruments, pp. 1-78.
- Krimm, S., Bandekar, J. (1986): Vibrational spectroscopy and conformation of peptides, polipeptides and proteins.- *Adv Protein Chem*, **38**: pp. 181-364.
- Vasilev, A. (2007): *Infrared spectroscopy of organic and natural products /AV Vasilev*,
- EV Hriyenko, AO Shchukin. – Ed. „Nauka“, St. Petersburg, pp. 1- 30.
- Tarasevich, B.N. (2012): *IR spectra of the main classes of organic compounds BN Tarasevich*, - Ed. „Nauka“, Moscow State University Lomonosov, pp. 1- 55
- Sverdlov L.M. (1970): *Vibrational spectra of polyatomic molecules / L.M. Sverdlov*, M.A. Konver, EP Marginal, - Ed. „Nauka“, Moscow, pp. 1-213.
- White, P.J., L.A. JOHNSON (Edit) (2003). *Corn: Chemistry and Technology.- American Association of Cereal Chemists, Minnesota, USA*, pp. 71-101.
- Radosavljević, M., V. Bekrić, I. Božović and J. Jakovljević (2000): Physical and chemical properties of various corn genotyps as a criterion of technological quality. *Genetika* 32 (3): pp. 319-329
- Radenović, Č., M. Jeremić, G.V. Maksimov, M. Filipovović, B.V. Trifunović, M. M. Mišović (1994a): Mogućnost korišćenja Ramanske spektroskopije u proučavanju otpornosti inbred linija kukuruza prema uslovima stresa. *Savremena poljoprivreda*, Vol. 42, No 1-2: pp. 5-19.
- Radenović, Č., M. Jeremić, G.V. MaximoV, M.M. Mišović, B.V. Trifunović, (1994b): Resonance Raman spectra of carotenoids in the maize seed tissue – a new approach in studies on effecte of temperatures and other enviromental factors on the state of vital functions. *J. Sci. Agric. Res* **55**, No 4: pp. 33-47.
- Radenović, Č., M. Jeremić, G.V. Maximov, M. M. Mišović, D. Selaković, B.V. Trifunović, (1995): Rezonantni Ramanski spektri semena kukuruza i njihova primena u proučavanju životnih funkcija. In: *Oplemenjivanje, proizvodnja i iskorišćavanje kukuruza –50 godina Instituta za kukuruz „Zemun Polje“*, Beograd, pp. 291-296.
- Radenović, Č., M. Jeremić, G.V. Maximov, M. M. Mišović, D. Selaković, (1998): Ressonance raman spectra of carotenodes 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, No. 95: Novi Sad*, pp. 41-50.
- Radenović, Č., M. Filipović, D., Selaković et. al. (2009): The prestigious maize inbred lines with erect top leaves. The priority performance of the efficient photosynthetic model in breeding, *Genetika*, Vol. 41, No. 1, 49-58.
- Radenović, Č., D.M. Grodzinskij, M. Filipović et. al. (2010): 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*, Tom 42, No 3: 187-201.
- Vollhardt, P.C & Schore N.E (1996). *Organic Chemistry*. W.H. Freeman and Company, United States, pp. 387-412, 472-473, 828.

DIAGNOSING CONFORMATIONAL AND FUNCTIONAL CHARACTERISTICS OF PRESTIGIOUS MAIZE INBRED LINES GRAIN USING INFRARED SPECTRA

Čedomir Radenović, Georgiy V. Maximov, Evgeniy V. Tyutyayev, Vitalina Victorovna Shutova, Nenad Delić, Mile Sečanski, Aleksandar Popović

Summary

This paper discusses the application of the infrared (IR) spectroscopy method to grain of prestigious maize inbred lines to determine its conformational and functional properties. The IR spectra of prestigious maize inbred lines grain has been registered in: ZPPL 186, ZPPL 225 and M1-3-3 Sdms. The existence of spectral bands varying in both, number and intensity and their shape, frequency and kinetics has been determined. Infrared spectral bands are determined by transmittance (%) and frequency (cm^{-1}) of chemical bonds' valence oscillations and deformation oscillations in functional groups: alkanes, alkenes, alcines, alcohols, ethers, carboxylic acids, esters, aldehydes and ketones that are characteristic for biogenic compounds of carbohydrates, vitamins, pigments and dietary fibres. By analysing IR spectral bands, conformational and functional properties of bio-genic compounds can be detected in grain of observed prestigious maize inbred lines.

Key words: Maize inbred line, grain, photosynthetic model, conformational properties of molecules, infrared spectra, spectral bands.

DIJAGNOSTIKOVANJE KONFORMACIONIH I FUNKCIONALNIH SVOJSTAVA ZRNA ELITNIH INBRED LINIJA KUKURUZA POMOĆU INFRACRVENIH SPEKTARA

Čedomir Radenović, Georgij V. Maksimov, Jevgenij V. Tjutjajev, Vitalina Viktorovna Šutova, Nenad Delić, Mile D. Sečanski, Aleksandar Popović

Sažetak

U ovom radu razmatra se primena metode infracrvene spektroskopije pri istraživanju zrna elitnih inbred linija kukuruza radi utvrđivanja konformacionih i funkcionalnih svojstava zrna. Registrovani su infracrveni spektri zrna inbred linija kukuruza: ZPPL 186, ZPPL 225 i M1-3-3 Sdms. Utvrđeno je da kod infracrvenih spektara postoje različite spektralne trake koje se međusobno razlikuju kako po svojoj brojnosti u spektru i po svom intenzitetu, tako i po svojem obliku, svojoj frekvenciji i svojoj kinetici. Svaka spektralna traka definisana je intenzitetom apsorpcije infracrvenog zračenja, tj. transmi-tancom u (%) i frekvencijom oscilacija u (cm^{-1}) valentnih i deformacionih oscilacija hemijskih veza koje postoje kod sledećih funkcionalnih grupa: alkana, alkena, alkina, alkohola, etra, karboksilne kiseline, etra, aldehida i ketona. Te funkcionalne grupe su karakteristične za biogena jedinjenja iz sastava ugljovodonika, vitamina, pigmenata i dijetetskih vlakana. Analizirajući trake infracrvenih spektara mogu se dijagnostikovati konformaciona i funkcionalna svojstva zrna ispitivanih inbred linija kukuruza.

Ključne reči: inbred linije kukuruza, zrno, fotosintetički model, konformaciona svojstva molekula, infracrveni spektri, spektralne trake.

Primljeno: 16. decembra 2014.
Prihvaćeno: 23. decembra 2014.