

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БОТАНИКИ
ИМЕНИ В.Ф. КУПРЕВИЧА НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ
НАУК БЕЛАРУСИ»

УДК: 633.15:631.531.026:631.531.027.33

ПУШКИНА
Надежда Викторовна

**ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В
ПРОЦЕССАХ ХРАНЕНИЯ СЕМЯН, РОСТА И РАЗВИТИЯ РАСТЕНИЙ
КУКУРУЗЫ (*Zea mays* L.) ПОСЛЕ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ
ЗЕРНОВОК ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ СВЧ-ДИАПАЗОНА**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук
по специальности 03.01.05 – физиология и биохимия растений

Минск, 2021

Работа выполнена в Белорусском государственном университете

Научные руководители: **Курченко Владимир Петрович** – кандидат биологических наук, доцент, заведующий НИЛ прикладных проблем биологии Белорусского государственного университета

Азарко Игорь Иосифович – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий НИЛ физики полупроводников Белорусского государственного университета

Официальные оппоненты: **Домаш Валентина Иосифовна** – доктор биологических наук, главный научный сотрудник сектора метаболизма и функций белков растений государственного научного учреждения «Институт экспериментальной ботаники имени В.Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси»

Скорина Владимир Владимирович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры плодовоовощеводства учреждения образования «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»

Оппонирующая организация: Государственное научное учреждение «Центральный ботанический сад Национальной академии наук Беларуси»

Защита диссертации состоится « 8 » апреля 2021 г. в 14-00 на заседании Совета по защите диссертаций Д 01.38.01 в государственном научном учреждении «Институт экспериментальной ботаники имени В.Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси» по адресу: 220072, г. Минск, ул. Академическая, 27.

E-mail: nan.botany@yandex.by. Телефон: (017) 378-18-51. Факс: (017) 322-18-53.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Я. Коласа Национальной академии наук Беларуси.

Автореферат разослан « 1 » марта 2021 г.

Ученый секретарь
Совета по защите диссертаций,
кандидат биологических наук



А.Ф. Судник

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое внимание уделяется поиску новых экологически безопасных способов стимуляции роста и защиты растений от болезней, вредителей, абиотических стрессов, основанных на повышении устойчивости за счет индукции внутренних резервов самого организма (Afzal, 2015). Повышение продуктивности сельскохозяйственных культур осуществляется с использованием различных видов предпосевной подготовки семян, а также за счет внедрения новых высокопродуктивных сортов, обладающих высоким адаптивным потенциалом (Corn: Chemistry and Technology, 2019). Однако не во всех случаях достигается требуемый эффект от применения данных способов.

Известно, что урожайность кукурузы в Беларуси в значительной степени зависит от климатических условий (Привалов, 2016), поэтому использование дополнительных технологических приемов в ее возделывании является крайне актуальным для нашей страны. В качестве таких способов может рассматриваться обработка семян электромагнитным полем сверхвысокочастотного диапазона (ЭМП СВЧ), особенно в органическом сельском хозяйстве. Однако еще не оптимизированы режимы ЭМП СВЧ обработки для стимуляции роста, развития и урожайности растений кукурузы белорусской селекции. Слабо изучены те компоненты и звенья метаболизма, которые непосредственно связаны с реализацией стимулирующего действия ЭМП СВЧ в прорастающих семенах.

В процессе хранения качество семян постоянно снижается (Веселова, 2008), в одной партии, хранившейся несколько лет, присутствуют зерна разных классов (ГОСТ 12038-84). Поэтому актуальной также является оценка изменения качества семян различных линий кукурузы в зависимости от условий и времени их хранения, что имеет важное практическое значение в селекции новых сортов, которая активно ведется в Беларуси в настоящее время. Учитывая важность данного направления, имеющего как фундаментальное, так и практическое значение, для поиска новых подходов в селекции и растениеводстве актуальным представляется изучение процессов изменения качества семян и влияния предпосевной обработки ЭМП СВЧ на рост и развитие растений кукурузы.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами. Диссертация выполнялась в рамках 3 заданий государственных программ: ГПНИ «Конвергенция», задание «Исследовать физико-биохимические и физиологические механизмы нелинейного взаимодействия биологических объектов с электромагнитными волнами низкой интенсивности» на 2011–2015 гг. № ГР20113074; ГПНИ «Конвергенция – 2020», подпрограмма № 12.3 «Объединение»,

задание 3.07 «Исследовать закономерности воздействия электромагнитного излучения миллиметрового диапазона длин волн на клеточные структуры» на 2016–2020 гг. № ГР20162620; ГПНИ «Химические технологии и материалы», подпрограмма 2.3 «Биорегуляторы растений», задание «Исследовать влияние обработки семян кукурузы СВЧ-облучением в сочетании со стабилизированными формами эфиров 5-аминолевулиновой кислоты и хитозаном на всхожесть и развитие растений» на 2016–2020 гг. № ГР20161263.

Цель и задачи исследования. Цель исследования – установить особенности изменения качества семян кукурузы в процессе их хранения, а также специфику действия и последствий обработки зерновок ЭМП СВЧ-диапазона на физиолого-биохимические параметры в период роста и развития растений кукурузы.

Для достижения цели работы были поставлены следующие **задачи**:

1. Исследовать влияние различных условий и длительности хранения зерновок кукурузы на их жизнеспособность и всхожесть по выходу электролитов в раствор.

2. Обосновать режим обработки ЭМП СВЧ-диапазона для гибридов кукурузы с различным исходным качеством семян, стимулирующий динамику прорастания, всхожесть и морфометрические параметры проростков на начальном этапе роста в зависимости от экспозиции электромагнитного воздействия.

3. Оценить влияние обработки ЭМП СВЧ-диапазона семян на изменения в составе и содержании низкомолекулярных эндогенных соединений (жирных кислот и их производных, веществ стероидной природы, продуктов перекисного окисления липидов, активных форм кислорода) на ранних этапах роста проростков кукурузы.

4. Определить содержание в корнях и листьях проростков кукурузы низкомолекулярных (фенольных соединений, токоферола) и неспецифических антиоксидантов – пероксидазы и пролина – после облучения семян ЭМП СВЧ-диапазона. На основе полученных экспериментальных и литературных данных предложить закономерности влияния ЭМП СВЧ на процессы прорастания зерновок кукурузы.

5. Охарактеризовать особенности роста, развития и основные показатели продуктивности (зеленая масса, масса зерна) растений кукурузы после обработки семян ЭМП СВЧ в условиях мелкоделяночных и полевых опытов.

Объекты исследования: гибриды Дарья, Полесский 101, Полесский 103, Полесский 176, Полесский 212, линия БЛ 33 С, линия Л 111/761 СВ и 40 морфологически различных линий кукурузы белорусской селекции.

Предметом исследования являлись изменения физиолого-биохимических параметров в процессе хранения семян, роста и развития растений кукурузы (*Zea mays* L.) после предпосевной обработки зерновок электромагнитным полем СВЧ-диапазона.

Научная новизна. Впервые показано, что разработанный бесконтактный экспресс-способ определения качества семян по выходу электролитов позволяет оценивать физиологические изменения посевного материала на разных этапах его хранения с достоверностью $r \rightarrow 0,98$. Научно обоснованы режимы ЭМП СВЧ облучения, оказывающие стимулирующее воздействие на прорастание зерновок кукурузы с различным исходным качеством семян и влажностью: частота – 64-66 ГГц, мощность – 10 мВт, время воздействия – 12 и 20 минут. Впервые установлено, что стимулирующий эффект обработки ЭМП СВЧ на всхожесть зависит от исходной влажности семян и сохраняется в течение 30 дней. Показано, что обработка семян ЭМП СВЧ модифицирует соотношение насыщенных и ненасыщенных жирных кислот, приводит к образованию сигнальных молекул, таких как оксипирины и кампестерол. ЭМП СВЧ облучение семян способствует развитию окислительных процессов, выражающихся в накоплении H_2O_2 , что коррелирует с накоплением малонового диальдегида (МДА). Отмечен рост активности пероксидазы и веществ, обладающих антиоксидантной активностью, таких как пролин, катехины, лейкоантоцианы, токоферолы и др. Впервые показано, что обработка ЭМП семян кукурузы с частотой 64-66 ГГц стимулирует рост продуктивности за счет повышения полевой всхожести и зеленой массы, количества початков и массы зерен в одном початке. Эффект зависит не только от режима обработки, но и от исходной влажности семян.

Положения диссертации, выносимые на защиту

1. Разработан бесконтактный экспресс-способ, основанный на измерении добротности, позволяющий определить жизнеспособность семян кукурузы по выходу электролитов в раствор в короткие сроки с высокой степенью достоверности ($r_x \rightarrow 0,98$). По параметрам добротности и электропроводности определены линии и гибриды кукурузы белорусской селекции, которые способны сохранять высокую всхожесть в период хранения.

2. Обоснован режим ЭМП СВЧ обработки семян кукурузы, стимулирующий рост и развитие растений: диапазон частот – 64-66 ГГц, время воздействия – 12 мин для элитных семян и 20 мин для гибридов F_1 . Стимулирующий эффект обработки ЭМП СВЧ-диапазона зависит от влажности семян и сохраняется определенный промежуток времени: максимальная всхожесть после ЭМП СВЧ воздействия наблюдается при влажности семян 12-15 % через 10 дней после облучения и сохраняется до 30 дней.

3. Обработка семян кукурузы ЭМП СВЧ способствует накоплению ненасыщенных жирных кислот и их производных, повышает содержание веществ стероидной природы преимущественно в корнях. При этом в листьях проростков кукурузы происходит интенсификация антиоксидантной активности за счет накопления фенольных соединений, токоферола, пролина и пероксидазы.

4. Потенциал продуктивности растений при обработке зерновок кукурузы ЭМП СВЧ реализуется за счет увеличения полевой всхожести, высоты растений, зеленой массы, количества и массы зерен в початке.

Личный вклад соискателя. Анализ научной литературы, выбор объекта исследования, планирование экспериментов, проведение лабораторных и полевых экспериментов на опытном поле биологического факультета БГУ, анализ, графическая и статистическая обработка полученных данных проводились лично автором. Основные положения, выносимые на защиту, принадлежат лично диссертанту. Выбор темы исследования, постановка задач проводились совместно с научными руководителями. Полевые опыты на опытном поле РНДУП «Полесский институт растениеводства» проводились совместно с к.с-х.н. Л. П. Шиманским и В. И. Кравцовым; полевые опыты на опытном поле обособленного подразделения «Ляховичский аграрный колледж» учреждения образования «Барановичский государственный университет» совместно с к.с-х.н. Е. А. Ритвинской. Кондуктометрические измерения и определение пролина проводились совместно с к.б.н. Ж. Н. Калацкой в ГНУ «Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси». Проведение анализов ГХ-МС осуществлялось совместно с к.б.н. Ю. С. Поляковым.

Апробация результатов диссертации. Основные положения, методика и научные результаты исследования представлены и обсуждены на заседаниях ученого совета и научного семинара биологического факультета Белорусского государственного университета, 8 международных научных конференциях, в том числе на 3 — за пределами РБ: The eighth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (Kharkov, 2013); NAROSSA – 19th International Conference for Renewable Resources and Plant Biotechnology (Poznan, 2014); Международной научной конференции «Молекулярные, мембранные и клеточные основы функционирования биосистем», в рамках XI съезда Белорусского общественного объединения фотобиологов и биофизиков (Минск, 2014); Международной научной конференции «Регуляция роста, развития и продуктивности растений» (Минск, 2015); Международной научной конференции «Молекулярные, мембранные и клеточные основы функционирования биосистем», в рамках XII съезда Белорусского общественного объединения фотобиологов и биофизиков (Минск, 2016); The ninth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (Kharkov, 2016); I Международной научной конференции молодых ученых, приуроченной к Году науки в Республике Беларусь «Современные проблемы экспериментальной ботаники» (Минск, 2017); Международной научно-практической конференции «Молекулярно-генетические и биотехнологические основы получения и применения синтетических и природных биологически

активных веществ» (Нарочанские чтения – 11) (Нарочь, 2017); Международной научной конференции «Регуляция роста, развития и продуктивности растений» (Минск, 2018).

Опубликованность результатов диссертации. По теме диссертации опубликована 21 работа. Из них: 8 статей в изданиях, включенных в перечень ВАК, и международных журналах, 9 – в научных журналах, рецензируемых сборниках и материалах научных конференций, 4 – в тезисах докладов. Общий объем опубликованных материалов составляет 7,2 листа (лично соискателя – 5,5 авторских листа), из них на статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК приходится 4,9 листа (лично соискателя – 3,5 авторских листа).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, аналитического обзора литературы, материалов и методов исследований, 3 экспериментальных глав, отражающих результаты исследований, заключения, библиографического списка, включающего 282 источника (из них 21 – собственные публикации, 98 – русскоязычные работы, 163 – англоязычные), и приложений. Текст диссертации изложен на 177 страницах машинописного текста. Всего в диссертации 46 рисунков и 30 таблиц. Приложения занимают 20 страниц и содержат 3 таблицы, 3 рисунка, 4 акта внедрения научных результатов, 1 патент на полезную модель и 2 диплома за участие в научно-технических ярмарках.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Анализ литературных данных (Balouchi, 2009; Нижарадзе, 2017; Вендин, 2014) показал, что обработка семян электромагнитным полем сверхвысокочастотного диапазона стимулирует прорастание и дальнейшее развитие проростков различных сельскохозяйственных и лекарственных культур. Однако большинство исследований в этой области сосредоточено на оценке влияния ЭМП на физиологические (Сотченко, 2018) и морфометрические изменения (Pietak, 2012). Есть фрагментарные данные о влиянии ЭМП на накопление фотосинтетических пигментов, белков и вторичных метаболитов (Hamada, 2007; Кондратенко, 2015; Senavirathna, 2014; Wang, 2018). На основе анализа литературных данных сделаны выводы об актуальности проведения исследований по изучению влияния ЭМП СВЧ воздействия на всхожесть, рост, развитие, урожайность и накопление отдельных физиолого-биохимических соединений в разновозрастных растениях кукурузы белорусской селекции.

Объекты и методы исследования. Объектом исследования служили семена кукурузы гибридов: Дарья, Полесский 101, Полесский 103, Полесский 176, Полесский 212, линия БЛ 33 С, линия Л 111/761 СВ и 40 морфологически различных линий.

Обработка ЭМП СВЧ проводилась в НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ в различных режимах (таблица 1) [9, 10, 11, 13, 18].

Таблица 1. – Режимы ЭМП СВЧ, использованные для обработки семян

Режим обработки	Частота, ГГц	Мощность, Вт	Плотность потока мощности, Вт; $\rho \times 10^3$	Время, с	Поглощенная энергия, Дж; $E \times 10^{-1}$	E_i/E_1 , отн. ед.
Режим 1.1	53–78	10^{-2}	0,83	480	3,98	1
Режим 1.2	53–78	10^{-2}	0,83	720	5,98	1,5
Режим 1.3	53–78	10^{-2}	0,83	1200	9,96	2,5
Режим 2.1	64–66	10^{-2}	0,83	480	3,98	1
Режим 2.2	64–66	10^{-2}	0,83	720	5,98	1,5
Режим 2.3	64–66	10^{-2}	0,83	1200	9,96	2,5
Режим 3.1	68–72	10^{-2}	0,83	480	3,98	1
Режим 3.2	68–72	10^{-2}	0,83	720	5,98	1,5
Режим 3.3	68–72	10^{-2}	0,83	1200	9,9	2,5

Динамика прорастания, всхожесть и морфометрические параметры семян кукурузы определялись в соответствии с ГОСТ 12038–84. Электропроводность и добротность определялись по выходу электролитов с использованием кондуктометра Hanna HI 9932 (Алексейчук, 2005), СВЧ-резонатора и векторного анализатора цепей (Mokhoff, 2015). Высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ) проводилась на хроматографе Agilent 1100 (Agilent Technologies, США). Хроматографический анализ компонентов метанольных экстрактов проводился с использованием газового хроматографа Agilent 6850 с масс-детектором. Определение свободного пролина проводилось на спектрофотометре СФ-46 при длине волны 517 нм по методике (Храмов и др., 1986; Bates, 1973). Активность пероксидазы определялась по Бояркину (Ермаков и др., 1987). Количественное определение АТФ проводилось в реакции с люцеферин-люцеферазой. Интенсивность свечения флуоресцирующего продукта во времени измеряли на люминометре при длине волн 560–580 нм (Уайт, 1981). Накопление активных форм кислорода (АФК) определялось с помощью окисления тиобензамида (1мМ) лактопероксидазой (10 мкг/мл) (Курганова и др., 1997). Уровень продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) определяли по накоплению МДА (ТБК-продуктов) (Курганова и др., 1997). Определение фенольных веществ, лейкоантоцианов и катехинов проводилось на ФЭКе с фильтром № 9 ($\lambda = 630$ нм) и фильтром № 5 ($\lambda = 490$ нм) в кювете 1 см (Сейдер, 1972). Полевые опыты проводились по стандартной методике (Доспехов, 1986). Анализ полученных

результатов проводился в 3-х-кратной биологической и аналитической повторностях. Статистическая обработка экспериментальных данных состояла в определении средних арифметических значений и их стандартных ошибок в программах Microsoft Excel 2010 и Statistica 8.0. Для оценки различий между результатами опыта и показателями контроля использовали параметрические t-критерий Стьюдента, t-тест Уэлча и непараметрический U-критерий Манна-Уитни. Корреляционный анализ проводился с использованием коэффициента Пирсона. Значимыми считались различия при их достоверности более 95 % ($p < 0,05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Определение физиологических показателей качества зерновок кукурузы по выходу электролитов

Косвенным показателем физиологического качества посевного материала служит изменение электропроводности водных вытяжек из семян, обусловленное выходом клеточных метаболитов, в том числе и электролитов. Предложен альтернативный экспресс-метод определения качества семян по выходу электролитов – измерение показателей добротности СВЧ-резонатора при помещении в него водных вытяжек из семян. При определении добротности можно проводить комплексный анализ водных вытяжек и получать более точные экспериментальные данные с минимальной погрешностью.

Так как в последние годы в нашей стране ведется селекция отечественных сортов и гибридов кукурузы, то анализировалась способность различных линий сохранять посевные качества после длительного естественного хранения и ускоренного старения. Установлена корреляционная зависимость между всхожестью, электропроводностью и добротностью водных вытяжек из 25 различных линий кукурузы урожая 2013 г. (рисунок 1). После трех лет хранения при 20 °С и влажности до 50 % только 5 линий сохранили всхожесть выше 78 %. Коэффициент корреляции между всхожестью и добротностью составляет $r \rightarrow 0,98$, а между электропроводностью и всхожестью $r \rightarrow 0,89$. Изучение 40 линий кукурузы урожая 2015 г. после 16 дней инкубации в условиях ускоренного старения показало, что только 8 сохранили высокую всхожесть ($> 78\%$), у остальных наблюдалось повышение электропроводности водных вытяжек, снижение всхожести и добротности. Показано, что в условиях ускоренного старения (УС) семена кукурузы гибрида Дарья дольше, чем Полесский 212, сохраняют высокую всхожесть.

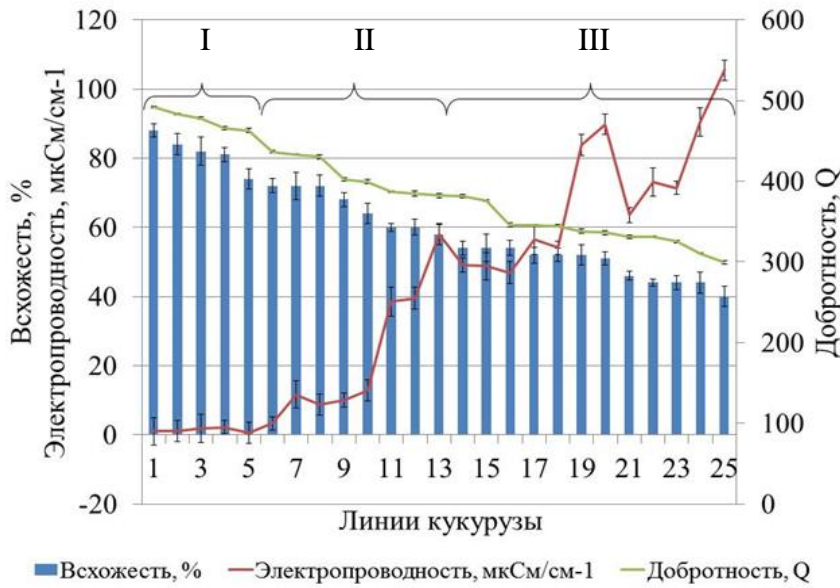


Рисунок 1. – Электропроводность, добротность водных вытяжек и всхожесть семян различных линий кукурузы после 3-х лет хранения

Таким образом, метод УС в сочетании с измерением электропроводности и добротности для определения выхода электролитов из зерновок кукурузы в раствор может быть рекомендован для скрининга и экспресс-оценки всхожести в процессе хранения и отбора линий для дальнейшей селекции по параметру сохранения посевных качеств [3, 4, 14, 19].

Влияние обработки электромагнитным полем сверхвысокочастотного диапазона на особенности прорастания зерновок кукурузы

В результате проведенных лабораторных опытов показано, что отдельные режимы ЭМП СВЧ обработки повышают динамику прорастания и всхожесть гибридов кукурузы на ранних этапах роста. Данные параметры у зерновок кукурузы гибрида Дарья (рисунок 2) и Полесский 103 возрастают после обработки ЭМП СВЧ



Рисунок 2. – Состояние проростков кукурузы гибрида Дарья на 4-ый день роста в контроле (А) и после обработки семян ЭМП (режим 2.2) (Б)

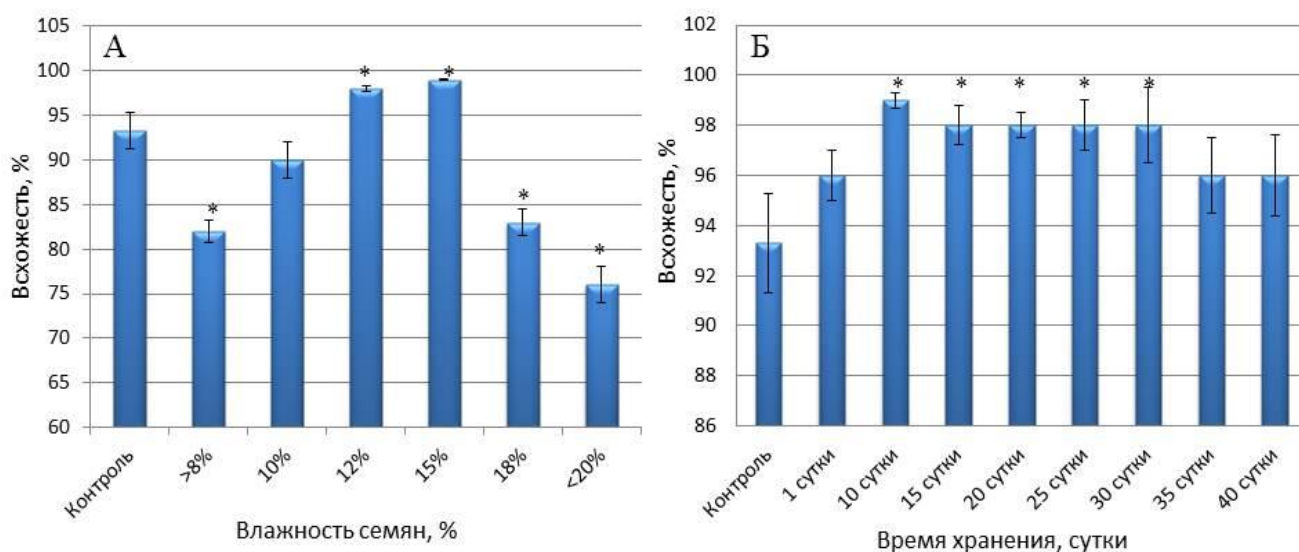
частотой 64-66 ГГц в течение 12 минут на 6,7 и 20,3 % соответственно. Зерновки гибрида Полесский 101 оказались чувствительны к воздействию ЭМП СВЧ в течение 20 минут. Показано,

что те режимы ЭМП СВЧ обработки семян кукурузы, которые повышали всхожесть, стимулировали и

выход электролитов до $27,76 \text{ мкСм/см}^{-1} \pm 1,33$. Увеличение выхода электролитов из ткани растений указывает на модификацию липидного бислоя клеточных мембран. Морфометрические параметры у исследуемых гибридов после обработки ЭМП СВЧ изменялись следующим образом: у семян гибрида Дарья после обработки ЭМП СВЧ

в режиме 2.2 длина корней увеличивается на 47,2 %, а побегов – на 66,3 %; у гибрида Полесский 103 на 45,3 и 60,5 % соответственно. Облучение ЭМП СВЧ-диапазоном в режиме 2.3 максимально повышало длину корней и побегов гибрида Полесский 101 на 60,5 и 36,3 % соответственно [6, 7, 9, 10, 11, 13, 15, 18].

Обработка ЭМП СВЧ максимально стимулирует всхожесть зерновок кукурузы с исходной влажностью 12 и 15 % (рисунок 3А). Анализ продолжительности сохранения стимулирующего действия ЭМП СВЧ после обработки семян кукурузы сорта Дарья до момента их прорастивания (рисунок 3Б) показал, что всхожесть максимально повышается через 10 дней после обработки выбранной частотой ЭМП и сохраняется на высоком уровне до 30 дней.



Примечание * – различия статистически достоверны по сравнению с контролем, $P < 0,05$

Рисунок 3. – Влияние обработки ЭМП СВЧ-диапазона на всхожесть зерновок кукурузы в зависимости от исходной влажности (А) и от времени после обработки до прорастивания (Б)

Проведенные анализы по исследованию содержания АТФ в сухих семенах после их обработки ЭМП СВЧ с частотой 64-66 ГГц в течение 12 мин показали, что количество АТФ в контроле и опыте не различается. Однако уже в первые сутки прорастания отмечено резкое повышение АТФ, необходимое для развития ростовых процессов. При этом в семенах, обработанных ЭМП, количество АТФ увеличилось на 55,9 % в первые сутки роста, что свидетельствует о стимуляции энергообразующих процессов, происходящих в проростках кукурузы. На 4 и 7-е сутки роста после обработки ЭМП СВЧ содержание АТФ возрастает по отношению к контролю на 38,9 и 27,9 % соответственно [5]. Можно полагать, что активация ростовых процессов после обработки семян ЭМП СВЧ происходит за счет существенного увеличения содержания АТФ в прорастающих семенах кукурузы на начальном этапе развития растений.

Стимуляция ростовых процессов, вызванная обработкой зерновок кукурузы ЭМП СВЧ, приводит к трансформации полиеновых С-18-, С-16-жирных кислот

(ЖК), гидролитических ферментов и отдельных компонентов антиоксидантной системы. В результате проведенных исследований показано, что после обработки семян ЭМП СВЧ-диапазона на 4-й день роста повысилось относительное суммарное содержание ЖК и их производных на 28,7 % в проростках кукурузы (таблица 2).

Таблица 2. – Содержание жирных кислот в проростках кукурузы на 4-й день роста после обработки семян ЭМП СВЧ

Наименование вещества	Проростки на 4-й день		
	Контроль, мкг/мл	ЭМП СВЧ, мкг/мл	+/- к контролю, %
Гидрокси метиловый эфир линолеидиновой кислоты (C18:2) CAS: 2566-97-4	3,9±0,01	6,2±0,02*	+57,8
Амид олеиновой кислоты (C18:1) CAS: 301-02-0	2,2±0,02	3,1±0,02*	+40,9
Амид стеариновой кислоты (C18) CAS: 124-26-5	2,2±0,02	2,7±0,01**	+22,2
Октадекановая кислота, 2, 3- дигидроксипропиловый эфир (C21) CAS: 123-94-4	4,1±0,01	5,2±0,01*	+26,8
Олеиновая кислота (C18:1) CAS: 112-80-1	2,9±0,01	3,2±0,04*	+7,1

Примечание * – различия статистически достоверны по сравнению с контролем, $P < 0,05$;

** – различия статистически достоверны по сравнению с контролем, $P < 0,001$

В корнях кукурузы к 12-му дню содержание глицерина, стеариновой и линоленовой кислот на 24,6 % превышает контроль. К 14-му дню повышается содержание глицерина, пальмитиновой, стеариновой и линоленовой кислот на 17,7 % по сравнению с контролем (таблица 3). Доминирующим веществом в клетках корней кукурузы на 12 и 14-й день роста является линоленовая кислота, которая входит в состав фосфолипидов, гликолипидов и играет важную роль в построении биологических мембран. Под влиянием электромагнитного поля СВЧ-диапазона в корнях кукурузы происходит снижение содержания насыщенных и, соответственно, увеличивается степень ненасыщенности жирных кислот за счет повышения индекса двойных связей (ИДС) – интегрального показателя, характеризующего степень ненасыщенности ЖК. Кроме того, α -линоленовая кислота используется растениями для синтеза простогландин-подобных соединений, оксипинов и C_{18} -изопростаноидов. А повышенное содержание гидроксиметилового эфира линолеидиновой кислоты и октадекановой кислоты, 2,3-дигидроксипропилового эфира на 57,8 и 26,8 % соответственно может свидетельствовать о том, что растения для формирования ответных реакций организма на внешнее воздействие, такое как ЭМП СВЧ, используют сигнальные молекулы, стимулирующие рост, развитие и

дифференцировку тканей. В связи с этим можно предположить, что стимуляция роста корней кукурузы под действием облучения осуществляется за счет накопления оксипинов и активации синтеза ЖК и их производных.

Таблица 3. – Содержание глицерина и жирных кислот в корнях кукурузы на 12 и 14-й день роста после обработки семян ЭМП СВЧ

Наименование вещества	Корни на 12-й день			Корни на 14-й день		
	Контроль, мкг/мл	ЭМП СВЧ, мкг/мл	+/- к контролю, %	Контроль, мкг/мл	ЭМП СВЧ, мкг/мл	+/- к контролю, %
Глицерин CAS: 56-81-5	2,4±0,03	2,6±0,01*	+8,3	2,4±0,02	2,6±0,02*	+8,3
Пальмитиновая кислота (С16) CAS: 57-10-3	2,2±0,02	2,2±0,06*	-	4,5±0,03	4,8±0,02*	+6,6
α-линоленовая кислота (С18:3) CAS: 463-40-1	5,2±0,03	7,8±0,03**	+50,0	7,5±0,02	9,3±0,06**	+24,0
Стеариновая кислота (С18) CAS: 57-11-4	2,8±0,02	3,1±0,03*	+10,7	1,4±0,01	1,9±0,02**	+35,7

Примечание * – различия статистически достоверны по сравнению с контролем, $P < 0,05$;

** – различия статистически достоверны по сравнению с контролем, $P < 0,001$

Обработка семян кукурузы ЭМП СВЧ к 14-му дню роста повышала относительное содержание кампестерола и стигмастерола в клетках корней кукурузы на 66,7 и 89,5 % соответственно (таблица 4). Кампестерол, в свою очередь, является сигнальной молекулой и непосредственным предшественником в синтезе brassinosteroidов. Стигмастерол – один из наиболее распространенных растительных стеролов, основная функция которого – сохранение структуры и физиологии клеточных мембран [7].

Таблица 4. – Содержание метаболитов стероидной природы в корнях после обработки семян кукурузы ЭМП СВЧ на 12 и 14-й день роста

Наименование вещества	Корни на 12-й день роста			Корни на 14-й день роста		
	Контроль, мкг/мл	ЭМП СВЧ, мкг/мл	+/- к контролю, %	Контроль, мкг/мл	ЭМП СВЧ, мкг/мл	+/- к контролю, %
Кампестерол CAS 474-62-4	1,6±0,01	1,7±0,01	+6,3	1,3±0,01	2,3±0,01*	+66,7
Стигмастерол CAS 83-48-7	5,1±0,01	5,3±0,01	+3,6	2,3±0,01	4,3±0,01*	+89,5
Гамма-стигмастерол CAS 83-48-7	-	-	-	1,3±0,01	2,2±0,01*	+64,2

Примечание * – различия статистически достоверны по сравнению с контролем, $P < 0,05$

В листьях кукурузы после обработки семян ЭМП СВЧ (64-66 ГГц, 12 мин) отмечено развитие окислительных процессов, выражающихся в накоплении АФК, а именно H_2O_2 . Уровень H_2O_2 в опытном образце на 4 и 7-й день роста на $17,4 \pm 0,9$ ($P < 0,005$) нмоль/мг и $11,3 \pm 1,2$ ($P < 0,005$) нмоль/мг превышал контроль. Обработка семян ЭМП СВЧ повышала содержание ТБК-продуктов (МДА) через 7–10 суток после прорастания на 26,1 и 37,4 % соответственно. Повышение количества ТБК-продуктов в клетках после обработки ЭМП СВЧ свидетельствует об усилении процессов ПОЛ. Выявлена корреляционная зависимость между изменением содержания H_2O_2 и накоплением МДА ($r = 0,91$), что показывает определяющую роль H_2O_2 в индукции процессов ПОЛ после воздействия ЭМП СВЧ на семена кукурузы. Генерация активных форм кислорода в проростках кукурузы, семена которых были обработаны ЭМП СВЧ, может быть тесно связана с изменением состояния антиоксидантной системы. В связи с этим анализировалось содержание важнейших компонентов антиоксидантной системы в листьях кукурузы разного возраста после обработки семян ЭМП СВЧ [5].

Отмечено повышение активности пероксидазы после обработки ЭМП СВЧ в листьях проростков кукурузы: на 7-й день активность данного фермента увеличивалась на 18,6 %, а на 10-й день – 40 %. Содержание катехинов и лейкоантоцианов в листьях кукурузы на 10-14-й день роста возрастает от 12,7 до 75 % соответственно. Обработка семян ЭМП СВЧ вызывала в клетках корней кукурузы метаболическую активацию процессов синтеза пролина. Показано, что его количество возрастало на 57,9 % по сравнению с контролем на 4-й день роста и на 22,3 % на 7-й день. К 12-му дню роста в листьях существенно возросло содержание веществ фенольной природы, а именно гидрохинона и 2,5-диметокси-гидрохинона на $4,34 \pm 0,01$ ($P < 0,001$) и $2,28 \pm 0,01$ ($P < 0,005$) по отношению к контролю. К 14-му дню роста в листьях кукурузы возрастает еще и относительное содержание токоферола и витамина Е относительно исходного уровня (таблица 5) [6, 21].

Таблица 5. – Содержание антиоксидантов в листьях кукурузы на 14-й день роста после обработки семян ЭМП СВЧ

Наименование вещества	Контроль, мкг/мл	ЭМП СВЧ, мкг/мл	+/- к контролю, %
2,5-диметокси-гидрохинон CAS 13239-13-9	$1,77 \pm 0,02$	$2,87 \pm 0,01^*$	+62,1
Метилловый эфир фенола CAS 532-91-2	$2,59 \pm 0,01$	$2,87 \pm 0,01^*$	+10,8
Гамма-токоферол CAS 54-28-4	$1,0 \pm 0,02$	$3,7 \pm 0,02^*$	+370,0
Витамин Е CAS 59-02-9	$1,1 \pm 0,01$	$3,98 \pm 0,02^*$	+361,8

Примечание * – различия статистически достоверны по сравнению с контролем, $P < 0,05$

Таким образом, результаты экспериментальных исследований по изучению влияния ЭМП СВЧ на состав метаболитов в разновозрастных корнях и листьях растений кукурузы позволяют предположить следующий механизм действия ЭМП СВЧ на ростовые параметры (рисунок 4). Известно, что внешнее электромагнитное воздействие сверхвысокочастотного диапазона в естественном солнечном спектре отсутствует. В связи с этим семена кукурузы реагируют на данный вид воздействия посредством адаптационно-компенсаторных перестроек. Первичное восприятие сигнала ЭМП СВЧ происходит на уровне поверхностного аппарата клеток (покрывы и клеточные мембраны) и связано с модификацией липидного бислоя. Раннее развитие сигнала связано с повышенным поглощением воды в процессе прорастания, эффекты от облучения схожи с длительным замачиванием в полевых исследованиях [8]. Это способствует активации ферментативных систем и повышенному содержанию гидролитических ферментов. Каталазы и гидролазы активно расщепляют запасные вещества семени (углеводы, липиды), что, в свою очередь, повышает содержание АТФ в первые сутки прорастания на 55,9 % [4, 7].



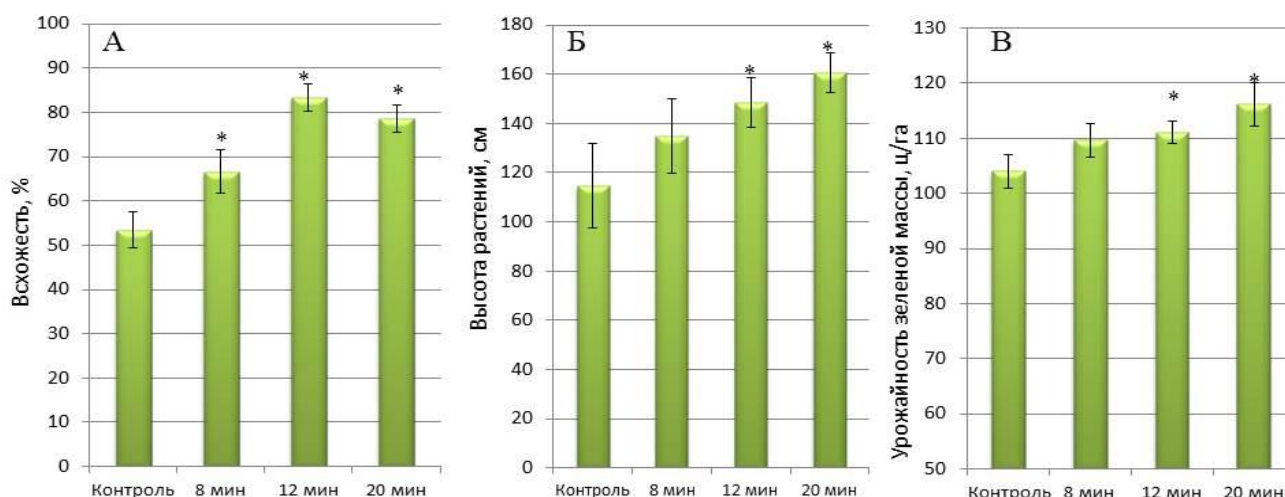
Рисунок 4. – Предлагаемый механизм влияния облучения ЭМП СВЧ семян кукурузы на процессы их прорастания

Более поздние реакции выражаются в стимуляции роста корней и листьев проростков кукурузы после обработки семян ЭМП СВЧ. Образование оксипинов в проростках кукурузы после обработки семян ЭМП СВЧ свидетельствует об использовании растениями сигнальных молекул для стимуляции роста, развития, а также формирования ответных реакций растительного организма на внешнее воздействие. Отмечены изменения в соотношении насыщенных и ненасыщенных жирных кислот в клетках корней и листьев растений кукурузы.

Показано развитие окислительных процессов, выражающихся в накоплении АФК, а именно H_2O_2 и продуктов ПОЛ, что способствовало повышению активности пероксидазы и росту уровня соединений, обладающих антиоксидантной активностью – пролина, хинонов, катехинов, α и γ -токоферолов. Можно полагать, что обработка семян кукурузы электромагнитным полем не только стимулирует прорастание семян и их всхожесть, морфометрические параметры, но и повышает устойчивость растений за счет избыточного синтеза вторичных метаболитов.

Рост, развитие и урожайность кукурузы после обработки семян ЭМП СВЧ в условиях полевых опытов

В результате проведенных в 2013–2016 гг. полевых мелкоделяночных опытов изучено влияние электромагнитного излучения на семена кукурузы в зависимости от режима обработки, влажности семян и их исходной лабораторной всхожести. Анализируя данные, представленные на рисунке 5А, видно, что всхожесть кукурузы гибрида Полесский 103 возрастает на 29,9 % после обработки семян частотой 64,0-66,0 ГГц в течение 12 минут.



Примечание * – различия статистически достоверны по сравнению с контролем, $P < 0,05$

Рисунок 5. – Влияние обработки ЭМП СВЧ на всхожесть (А), высоту растений (Б) и зеленую массу (В) гибрида Полесский 103 в полевых экспериментах

Необходимо отметить, что полевая всхожесть кукурузы гибрида Полесский 103 возрастает при обработке указанными частотами в течение 8 и 20 мин от 13,2 до 24,5 % соответственно. Показано, что максимальный стимулирующий эффект на высоту растений кукурузы оказывает обработка частотой 64,0-66,0 ГГц и временем воздействия 12 мин (рисунок 5Б). Обработка семян ЭМП СВЧ в течение 12 и 20 минут увеличивала прирост зеленой массы на 5,6–12,2 ц/га по отношению к контролю (рисунок 5В). Масса 1000 семян возрастала после всех режимов обработки от 17,7 до 33,9 % по отношению к контролю [1, 2, 8].

Полевые опыты по исследованию влияния обработки семян ЭМП СВЧ проводились на гибридах: Дарья, Полесский 103, Полесский 101 с различной исходной влажностью. Всхожесть семян гибрида Дарья (влажность 15 %) и Полесский 103 (влажность 12 %) возрастала при обработке ЭМП СВЧ в течение 12 минут частотой 64-66 ГГц на 29,9 и 6 % соответственно. В то же время всхожесть гибрида Дарья с влажностью 10 % после обработки ЭМП СВЧ снижается на 5,6 % в полевых опытах. Зеленая масса увеличивается после обработки семян ЭМП СВЧ у гибридов Дарья (влажность 15 %) и Полесский 103 (влажность 12%) – на 50 и 64 ц/га соответственно. У семян гибрида Дарья с влажностью 15 % масса 1000 семян увеличивалась на 6,5 %, у гибридов Полесский 103 и Полесский 101 – на 5,6 и 11,7 % соответственно [12, 16]. Комплексные исследования влияния ЭМП СВЧ обработки с химическим протравителем Виал-ТТ показали, что данное воздействие ускоряет развитие растений линии БЛ 33 С. У линии БЛ 33 С при обработке семян ЭМП СВЧ (режим 2.2) или ЭМП СВЧ (режим 2.2) + Виал-ТТ коэффициент размножения семян увеличивается на 1,3–1,4 млн зерен на 1 га в опытах, а урожайность початков повышается на 9,3–10,4 ц/га по сравнению с контролем.

Исследования, проведенные на опытном поле обособленного подразделения «Ляховичский аграрный колледж» учреждения образования «Барановичский государственный университет», показали, что обработка семян кукурузы ЭМП СВЧ оказала положительное влияние на количество зерна. Данный параметр у зерна кукурузы гибрида Полесский 176 под действием обработки возрастал на 15,2 ц/га, у гибрида Дарья на 8,4 ц/га, а у линии БЛ 33 С на 7,9 ц/га. Исследования, проведенные на опытном поле РНДУП «Полесский институт растениеводства», подтвердили эффективность предпосевной обработки ЭМП СВЧ семян кукурузы гибрида Полесский 175 СВ и самоопыляющейся линии БЛ 33 С [17, 20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты, полученные в диссертации

1. Разработанный бесконтактный экспресс-способ позволяет определить физиологическое качество зерновок кукурузы в короткие сроки с высокой степенью достоверности. Показано, что в условиях ускоренного старения семена кукурузы гибрида Дарья дольше, чем Полесский 212, способны сохранять высокую всхожесть. Выявленные закономерности потери всхожести семян кукурузы при ускоренном старении дают возможность определить в короткие сроки качество семян по выходу электролитов. С использованием данного метода установлено, что из 25 исследуемых линий кукурузы урожая 2013 г. только 5 сохранили всхожесть > 78 %, находясь в оптимальных условиях хранения. Из 40 изученных линий кукурузы урожая 2015 г. только 8 способны сохранять высокую всхожесть (от 82 до 78 %) после инкубации в условиях ускоренного старения 16 дней. Поэтому они являются наиболее перспективными для дальнейшей селекции по признаку сохранения посевных качеств и устойчивости к неблагоприятным условиям хранения. Таким образом, метод ускоренного старения в сочетании с определением электропроводности и добротности может использоваться для скрининга качества посевного материала в период хранения [3, 4, 14, 19].

2. В результате проведенных лабораторных исследований показано, что динамика прорастания и всхожесть семян кукурузы гибрида Дарья и Полесский 103 максимально возрастают после обработки ЭМП СВЧ в частотном диапазоне 64-66 ГГц и времени воздействия 12 мин. Всхожесть у этих гибридов возрастает на 6,7 и 20,3 % соответственно. Для семян гибрида Полесский 101 с пониженной исходной всхожестью (53 %) потребовалось больше времени – 20 мин, при обработке в частотном диапазоне 64-66 ГГц для стимуляции ростовых параметров. Впервые показано, что всхожесть максимально возрастает после ЭМП СВЧ облучения при влажности семян 12-15 % через 10 дней после обработки и сохраняется до 30 дней. Показано, что те режимы ЭМП СВЧ обработки (режим 2.1, режим 2.2, режим 2.3) семян кукурузы, которые повышали всхожесть, приводили к увеличению выхода электролитов до $27,76 \pm 1,33$ мкСм/см⁻¹. Также обработка семян ЭМП СВЧ способствовала увеличению содержания АТФ на 55,9 % на начальном этапе прорастания семян кукурузы [5, 6, 9, 10, 11, 13, 15, 18].

3. Установлено, что одним из механизмов стимулирующего действия ЭМП СВЧ (64-66 ГГц, 12 мин) является изменение соотношения насыщенных и ненасыщенных жирных кислот в клетках корней и листьев проростков кукурузы. Отмечено снижение относительного содержания насыщенных и, соответственно, увеличение ненасыщенных ЖК в корнях кукурузы на 12 и 14-й день роста после обработки семян ЭМП СВЧ. Показано, что на начальном этапе прорастания ЭМП СВЧ облучение семян кукурузы стимулирует образование сигнальных молекул –

оксилипинов. К 14-му дню роста после исследуемой обработки семян в корнях кукурузы возрастает относительное содержание веществ стероидной природы, таких как кампестерол и стигмастерол, на 66,7 и 89,5 % соответственно [7]. В листьях кукурузы после обработки семян ЭМП СВЧ отмечено развитие окислительных процессов, выражающихся в накоплении АФК, а именно H_2O_2 . Обработка семян ЭМП СВЧ повышала содержание ТБК-продуктов (МДА) через 7-10 суток после прорастания на 26,1 и 37,4 % соответственно. Выявлена корреляционная зависимость между изменением содержания H_2O_2 и накоплением МДА ($r = 0,91$), что показывает определяющую роль H_2O_2 в индукции процессов ПОЛ после воздействия ЭМП СВЧ на семена кукурузы. В проростках кукурузы отмечена интенсификация антиоксидантной системы за счет накопления вторичных метаболитов (токоферола, витамина Е) и неспецифических антиоксидантов (пролина и пероксидазы) [5, 7, 21].

4. Показано, что предпосевная обработка семян ЭМП СВЧ влияет на ростовые процессы растений кукурузы в полевых условиях. Показано, что воздействие ЭМП СВЧ в диапазоне частот 64-66 ГГц в течение 12 и 20 минут стимулирует полевую всхожесть, высоту растений, зеленую массу и массу 1000 зерен у гибридов Дарья, Полесский 103, Полесский 101 и линии БЛ 33 С с исходной лабораторной влажностью 12-15 %. Установлено, что обработка ЭМП СВЧ отрицательно влияет на ростовые параметры в полевых условиях на семена с низкой влажностью (до 10 %). Исследования, проведенные на опытном поле обособленного подразделения «Ляховичский аграрный колледж» учреждения образования «Барановичский государственный университет», показали, что обработка семян кукурузы ЭМП СВЧ оказала положительное влияние на урожайность зерна.

Таким образом, показано, что при тщательном подборе времени обработки, частоты, исходной влажности семян предпосевная стимуляция электромагнитным полем сверхвысокочастотного диапазона может быть использована в технологии возделывания кукурузы с целью увеличения ее всхожести и продуктивности. Кроме того, перспективным является использование данной обработки для поднятия всхожести семян с низкими посевными кондициями для их дальнейшего использования в практике сельского хозяйства [1, 2, 8, 12, 16, 17, 20].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Метод ускоренного старения в сочетании с определением добротности рекомендуется для предварительного скрининга и прогнозирования сохранения качества семян кукурузы в процессе хранения. Разработка удостоена диплома III степени за участие в Санкт-Петербургской научно-технической ярмарке 14 марта 2019 года.

2. Предпосевная обработка семян кукурузы ЭМП СВЧ в частотном диапазоне 64–66 ГГц и временем обработки 12 мин может использоваться в технологии

возделывания кукурузы с целью увеличения ее всхожести и продуктивности. Разработка удостоена диплома II степени с вручением серебряной медали за участие в Санкт-Петербургской научно-технической ярмарке 14 марта 2016 года. Полученные результаты также могут применяться в технологии возделывания других сельскохозяйственных культур для повышения всхожести и урожайности (Акт внедрения в производственный процесс РУНП «Брестская областная сельскохозяйственная опытная станция НАН Беларуси» от 11.04.2017; Акт внедрения в производственный процесс РУП «Гродненская овощная фабрика» от 01.04.2017).

3. На основе результатов, полученных в диссертационной работе, разработаны циклы лекций, которые внедрены в учебный процесс кафедры физики и техники полупроводников физического факультета Белорусского государственного университета и кафедры ботаники факультета естествознания Белорусского государственного педагогического университета имени Максима Танка (акт о практическом использовании результатов исследования: протокол № 0304/622 от 02.06.2017; акт о практическом использовании результатов исследования: протокол № 10-05-17 от 11.06.2018).

4. Практическая значимость результатов, полученных в ходе выполнения работы, подтверждается патентом ВУ 8680 «Устройство для предпосевной обработки семян».

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в научных изданиях, включенных в перечень ВАК Республики Беларусь и международных журналах

1. Пушкина, Н. В. Влияние различных режимов предпосевной обработки электромагнитным полем сверхвысокочастотного диапазона на всхожесть кукурузы / Н. В. Пушкина, Л. П. Шиманский, В. П. Курченко // Тр. Белорус. гос. ун-та. Сер.: Физиол., биохим. и молекуляр. основы функционирования биосистем. – 2014. – Т. 9, ч. 2. – С. 203–208.

2. Пушкина, Н. В. Влияние предпосевной электромагнитной обработки семян на всхожесть семян кукурузы / Н. В. Пушкина, В. П. Курченко // Тр. Белорус. гос. ун-та. Сер.: Физиол., биохим. и молекуляр. основы функционирования биосистем. – 2014. – Т. 9, ч. 2. – С. 198–202.

3. Пушкина, Н. В. Особенности ускоренного старения семян кукурузы при обработке электромагнитным полем сверхвысокочастотного диапазона / Н. В. Пушкина, В. П. Курченко, Ж. Н. Калацкая // Ботаника : (исследования) : сб. науч. тр. / Ин-т эксперим. ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси [и др.]. – Минск, 2015. – Вып. 44. – С. 307–314.

4. Пушкина, Н. В. Возможность использования электрофизических методов для оценки физиологического качества семян кукурузы / Н. В. Пушкина, В. П. Курченко, Ж. Н. Калацкая // Вестн. Белорус. гос. ун-та. Сер. 2, Химия. Биология. География. – 2016. – № 1. – С. 26–30.

5. Пушкина, Н. В. Влияние предпосевной обработки семян электромагнитным полем сверхвысокочастотного диапазона на структурно-функциональное состояние проростков кукурузы / Н. В. Пушкина // Междунар. науч.-исслед. журн. – 2016. – № 4 (46), ч. 5. – С. 32–34.

6. Пушкина, Н. В. Предпосевная обработка семян кукурузы электромагнитным полем СВЧ-диапазона (сообщение 1). Оптимизация времени и диапазона резонансных частот воздействия на всхожесть растений / Н. В. Пушкина, В. А. Карпович // Тр. Белорус. гос. ун-та. Сер.: Физиол., биохим. и молекуляр. основы функционирования биосистем. – 2016. – Т. 11, ч. 2. – С. 156–163.

7. Пушкина, Н. В. Предпосевная обработка семян кукурузы электромагнитным полем СВЧ диапазона (сообщение 2). Влияние резонансных частот на ростовые процессы и их регуляцию в корнях и проростках / Н. В. Пушкина, В. П. Курченко // Тр. Белорус. гос. ун-та. Сер.: Физиол., биохим. и молекуляр. основы функционирования биосистем. – 2016. – Т. 11, ч. 2. – С. 164–183.

8. Пушкина, Н. В. Предпосевная обработка семян кукурузы электромагнитным полем СВЧ-диапазона (сообщение 3). Влияние резонансных частот на рост, развитие и урожайность в условиях полевых опытов / Н. В. Пушкина, В. П. Курченко // Тр. Белорус.

гос. ун-та. Сер.: Физиол., биохим. и молекулярные основы функционирования биосистем. –2016. – Т. 11, ч. 2. – С. 184–198.

Статьи в журналах, сборниках статей и материалы конференций

9. Модифицированный метод предпосевной микроволновой обработки семян / Н. В. Пушкина, Н. В. Любецкий, В. А. Карпович, В. Н. Родионова // Новости науки и технологий. – 2012. – № 2 (21). – С. 36–40.

10. Модифицированное устройство предпосевной обработки семян электромагнитным полем сверхвысокочастотного диапазона / В. А. Карпович, Н. В. Любецкий, Н. В. Пушкина, Г. И. Вольнец // Приборостроение – 2013 : материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 20–22 нояб. 2012 г. / Белорус. нац. техн. ун-т [и др.] ; редкол.: О. К. Гусев [и др.]. – Минск, 2013. – С. 161–163.

11. Pushkina, N. V. Usage of circularized electromagnetic mm-waves for pre-sowing seed treatment / N. V. Pushkina, V. A. Karpovich, N. V. Liubetski // The eighth international Kharkov symposium on physics and engineering of microwaves, millimeter and submillimeter waves (MSMW'13), Kharkov, Ukraine, 23–28 June 2013 / Inst. for Radiophysics a. Electronics of Nat. Acad. of Sciences of Ukraine [et al.]. – Kharkov, 2013. – P. 532–534.

12. Пушкина, Н. В. Влияние различных режимов предпосевной СВЧ обработки на выращивание кукурузы сорта «Полесский 103» / Н. В. Пушкина, В. П. Курченко // Молекулярные, мембранные и клеточные основы функционирования биосистем : междунар. науч. конф. : одиннадцатый съезд Белорус. обществ. об-ния фитобиологов и биофизиков, Минск, 17–20 июня 2014 г. : сб. ст. : в 2 ч. / Ин-т биофизики и клеточ. инженерии НАН Беларуси [и др.] ; редкол.: И. Д. Волоотовский [и др.]. – Минск, 2014. – Ч. 2. – С. 127–130.

13. Pushkina, N. Pre-sowing seeds treatment by microwave / N. Pushkina, V. Karpovich // 9th International Kharkiv symposium on physics and engineering of microwaves, millimeter and submillimeter waves (MSMW'2016), Kharkiv, Ukraine, 20–24 June 2016 / Inst. for Radiophysics a. Electronics of Nat. Acad. of Sciences of Ukraine [et al.]. – Kharkiv, 2016. – P. 1-5.

14. Пушкина, Н. В. Использование электрофизических методов для контроля всхожести семян кукурузы / Н. В. Пушкина // Молекулярные, мембранные и клеточные основы функционирования биосистем : междунар. науч. конф. : двенадцатый съезд Белорус. обществ. об-ния фотобиологов и биофизиков, Минск, 28–30 июня 2016 г. : сб. ст. : в 2 ч. / Ин-т биофизики и клеточ. инженерии НАН Беларуси [и др.] ; редкол.: И. Д. Волоотовский [и др.]. – Минск, 2016. – Ч. 2. – С. 239–242.

15. Пушкина, Н. В. Феноменологическая модель влияния предпосевной стимуляции семян кукурузы ЭМП СВЧ на начальных этапах онтогенеза / Н. В. Пушкина, С. И. Максимов, В. А. Карпович // Молекулярно-генетические и биотехнологические основы получения и применения синтетических и природных

биологически активных веществ (Нарочанские чтения – 11) : материалы междунар. науч.-практ. конф., 20–23 сент. 2017 г. / Беларус. гос. ун-т, Сев.-Кав. федер. ун-т ; сост.: В. П. Курченко, А. Д. Лодыгин. – Минск ; Ставрополь, 2017. – С. 88–92.

16. Пушкина, Н. В. Влияние предпосевной электромагнитной обработки семян кукурузы на урожайность / Н. В. Пушкина // Современные проблемы экспериментальной ботаники : материалы I междунар. науч. конф. молодых ученых, Минск, 27–29 сент. 2017 г. / Ин-т эксперим. ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси. – Минск, 2017. – С. 115–122.

17. Пушкина, Н. В. Влияние различных видов предпосевной обработки семян на зерновую продуктивность кукурузы (*ZEA MAIZ L.*) / Н. В. Пушкина, Е. Э. Абарова, Е. М. Ритвинская // Сельское хозяйство – проблемы и перспективы : сб. науч. тр. / Гродн. гос. аграр. ун-т. – Гродно, 2019. – Т. 45 : Агрономия. – С. 126–128.

Тезисы конференций

18. Pushkina, N. V. Pre-sowing treatment of seeds by microwaves / N. V. Pushkina // NAROSSA : the 19th Intern. conf. for renewable resources and plant biotechol., Poznan, Poland, 16–17 June 2014. – Poznan, 2014. – P. 213.

19. Пушкина, Н. В. Влияние обработки электромагнитным полем сверхвысокочастотного диапазона на качество семян кукурузы в условиях ускоренного старения / Н. В. Пушкина, В. П. Курченко, Ж. Н. Калацкая // Регуляция роста, развития и продуктивности растений : материалы VIII междунар. науч. конф., Минск, 28–30 окт. 2015 г. / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т эксперим. ботаники им. В. Ф. Купревича, Беларус. обществ. об-ние физиологов растений ; науч. ред. Н. А. Ламан. – Минск, 2015. – С. 98.

20. Пушкина, Н. В. Влияние различных видов предпосевной обработки семян на зерновую продуктивность кукурузы (*Zea maiz L.*) / Н. В. Пушкина, В. П. Курченко // Регуляция роста, развития и продуктивности растений : материалы IX междунар. науч. конф., Минск, 24–26 окт. 2018 г. / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т эксперим. ботаники им. В. Ф. Купревича, Беларус. обществ. об-ние физиологов растений ; науч. ред. Н. А. Ламан. – Минск, 2018. – С. 114.

21. Пушкина, Н. В. Влияние ЭМП СВЧ на накопление вторичных метаболитов в проростках кукурузы (*Zea maiz L.*) / Н. В. Пушкина // Регуляция роста, развития и продуктивности растений : материалы IX междунар. науч. конф., Минск, 24–26 окт. 2018 г. / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т эксперим. ботаники им. В. Ф. Купревича, Беларус. обществ. об-ние физиологов растений ; науч. ред. Н. А. Ламан. – Минск, 2018. – С. 115.

Патенты:

1. Устройство для предпосевной обработки семян : пат. ВУ 8680 / В. А. Карпович, Н. В. Любецкий, Н. В. Пушкина, Е. В. Спиридович. – Оpubл. 30.10.2012.

РЭЗІЮМЭ**Пушкіна Надзея Віктараўна****ЗМЯНЕННЕ ФІЗІЁЛАГА-БІАХІМІЧНЫХ ПАРАМЕТРАЎ ПАДЧАС
ЗАХОЎВАННЯ НАСЕННЯ, РОСТУ І РАЗВІЦЦЯ РАСЛІН КУКУРУЗЫ
(*Zea mays* L.) ПАСЛЯ ПЕРАДПАСЯЎНОЙ АПРАЦОЎКІ ЗЕРНЯ
ЭЛЕКТРАМАГНІТНЫМ ПОЛЕМ ЗВЧ-ДЫАПАЗОНУ**

Ключавыя словы: кукуруза, насенне, лініі, перадпасяўная апрацоўка, ЭМП ЗВЧ, электраправоднасць, дыхтоўнасць, водныя выцяжкі, фізічныя метады, тлустыя кіслоты, другасныя метабаліты, аксіліпіны, стэроідныя злучэнні, ураджайнасць кукурузы.

Мэта працы: усталяваць асаблівасці змены якасці насення кукурузы падчас яго захоўвання, а таксама спецыфіку дзеяння і паслядзеяння апрацоўкі ЭМП ЗВЧ-дыапазону ў перыяд росту і развіцця раслін кукурузы.

Метады даследавання: фізіялагічныя, біяхімічныя, біяфізічныя, ВЭЖХ, ГХ-МС, спектрафотаметрычныя, аналітычныя, статыстычныя.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Распрацаваны бескантактавы экспрэс-метад дазваляе вызначыць пасяўныя якасці насення кукурузы ў кароткія тэрміны з высокай ступенню дакладнасці. Абгрунтаваны рэжым ЭМП ЗВЧ апрацоўкі насення кукурузы, які стымулюе пачатковыя этапы росту і развіцця: дыапазон частот – 64-66 ГГц, магутнасць – 10 мВт, час уздзеяння – 12 хвілін для элітнага насення і 20 хвілін для гібрыдаў F₁. Упершыню паказана, што максімальны эфект стымуляцыі ўсходжасці назіраецца пры вільготнасці насення 12-15 % праз 10 дзён пасля апрацоўкі і захоўваецца да 30 дзён. Біяхімічны аналіз паказаў, што апрацоўка насення кукурузы ЭМП ЗВЧ спрыяе назапашванню тлустых кіслот, аксіліпінаў, рэчываў стэроіднай прыроды пераважна ў каранях. Пры гэтым у лісцях адбываецца ўзмацненне акісляльных працэсаў і інтэнсіфікацыі антыаксідантнай актыўнасці. Патэнцыял прадуктыўнасці раслін пры перадпасяўной апрацоўцы зерня кукурузы ЭМП ЗВЧ рэалізуецца за кошт павелічэння палявой усходжасці, вышыні раслін, зялёнай масы, масы і колькасці зерняў у адным катаху.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Паказана, што пры дбайным падборы часу апрацоўкі ЭМП ЗВЧ, частотнага дыапазону ўздзеяння і іншых параметраў дадзены метад можа быць выкарыстаны ў тэхналогіі вырошчвання кукурузы з мэтай павелічэння яе ўсходжасці і прадуктыўнасці.

Галіна ўжывання: фізіялогія і біяхімія раслін, лабараторыі па кантролі якасці насення, раслінаводства, сельская гаспадарка.

РЕЗЮМЕ**Пушкина Надежда Викторовна****ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ПРОЦЕССАХ ХРАНЕНИЯ СЕМЯН, РОСТА И РАЗВИТИЯ РАСТЕНИЙ КУКУРУЗЫ (*Zea mays* L.) ПОСЛЕ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНОВОК ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ СВЧ-ДИАПАЗОНА**

Ключевые слова: кукуруза, семена, линии, предпосевная обработка, ЭМП СВЧ, электропроводность, добротность, водные вытяжки, физические методы, жирные кислоты, вторичные метаболиты, оксипирины, стероидные соединения, урожайность кукурузы.

Цель работы: установить особенности изменения качества семян кукурузы в процессе их хранения, а также специфику действия и последствий обработки ЭМП СВЧ-диапазона в период роста и развития растений кукурузы.

Методы исследования: физиологические, биохимические, биофизические, ВЭЖХ, ГХ-МС, спектрофотометрические, аналитические, статистические.

Полученные результаты и их новизна. Разработанный бесконтактный экспресс-метод позволяет определить посевные качества семян кукурузы в короткие сроки с высокой степенью достоверности. Обоснован режим ЭМП СВЧ обработки семян кукурузы, стимулирующий начальные этапы роста и развития: диапазон частот – 64-66 ГГц, мощность – 10 мВт, время воздействия – 12 мин для элитных семян и 20 мин для гибридов F₁. Впервые показано, что максимальный эффект стимуляции наблюдается при влажности семян 12-15 % через 10 дней после обработки и сохраняется до 30 дней. Биохимический анализ показал, что обработка семян кукурузы ЭМП СВЧ способствует накоплению жирных кислот, оксипиринов, веществ стероидной природы преимущественно в корнях. При этом в листьях происходит усиление окислительных процессов и интенсификации антиоксидантной активности. Потенциал продуктивности растений при предпосевной обработке зерновок кукурузы ЭМП СВЧ реализуется за счет увеличения полевой всхожести, высоты растений, зеленой массы, массы и количества зерен в одном початке.

Рекомендации по использованию. Показано, что при тщательном подборе времени обработки ЭМП СВЧ, частотного диапазона воздействия и других параметров данный метод может быть использован в технологии возделывания кукурузы с целью увеличения ее всхожести и продуктивности.

Область применения: физиология и биохимия растений, лаборатории по контролю качества семян, растениеводство, сельское хозяйство.

SUMMARY**Pushkina Nadezhda Viktorovna****CHANGE OF PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL PARAMETERS DURING SEED STORAGE, GROWTH AND DEVELOPMENT OF CORN PLANTS (*Zea mays* L.) AFTER PRE-SOWING TREATMENT OF SEEDS BY ELECTROMAGNETIC FIELD OF THE MICROWAVE RANGE**

Key words: corn, seeds, lines, pre-sowing treatment, microwave EMF, electrical conductivity, figure of merit, water extracts, physical methods, fatty acids, secondary metabolites, oxylipins, steroid compounds, corn yield.

Purpose of the work: to establish the peculiarities of changes in the quality of corn seeds during their storage, as well as specific features of the action and the aftereffect of microwave EMF exposure during the growth and development of corn plants.

Research methods: physiological, biochemical, biophysical, HPLC, GC-MS, spectrophotometric, analytical, statistical.

The results obtained and their novelty. The developed contactless express method makes it possible to determine the sowing qualities of corn seeds in a short time with a high degree of reliability. The mode of microwave EMF of corn seeds, stimulating the initial stages of growth and development (frequency range – 64-66 GHz, power – 10 mW, exposure time – 12 min for elite seeds and 20 min for F₁ hybrids) is substantiated. It was shown for the first time that the maximum stimulation effect is observed at 12-15% moisture content of the seeds 10 days after the treatment and lasts up to 30 days. The biochemical analysis showed that microwave EMF treatment of corn seeds promotes the accumulation of fatty acids, oxylipins, steroid substances mainly in the roots. At the same time, the leaves demonstrate an increase in oxidative processes and an intensification of antioxidant activity. The potential of plant productivity during the pre-sowing treatment of corn kernels with microwave EMF is realized by increasing field germination, plant height, herbage, mass and number of grains in one cob.

Recommendations for use. It is shown that with a careful selection of the processing time required for microwave EMF, the frequency range of exposure and other parameters, this method can be used in the technology of corn cultivation in order to increase its germination and productivity.

Scope: physiology and biochemistry of plants, seed quality control laboratories, plant growing, agriculture.