

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ СЕМЕННОГО МАТЕРИАЛА ЗЕРНОБОБОВЫХ КУЛЬТУР НА ИХ ПОСЕВНЫЕ КАЧЕСТВА И ПРОДУКТИВНОСТЬ

*Государственное научное учреждение «Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси», пр. Независимости, 68, г. Минск, 220072, Республика Беларусь, azharonok@imaph.bas-net.by

**Государственное научное учреждение «Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси», ул. Московская, 204, г. Брест, 224020, Республика Беларусь, PAEILAB@tut.by

Введение

Увеличение производства и повышение урожайности сельскохозяйственной продукции в условиях Белорусского Полесья являются одним из приоритетных направлений хозяйственного развития Республики Беларусь на 2009–2010 годы [1]. Особенно это касается зернобобовых культур: люпина узколистного (*Lupinus angustifolius* L.), донника белого (*Melilotus albus* Desr.), эспарцета песчаного (*Onobrychis arenaria* L.), люцерны посевной (*Medicago sativa* L.), галеги восточной (*Galega orientalis* L.), занимающих значительную часть посевных площадей и обеспечивающих хозяйства республики большим количеством высокобелковой зеленой биомассы [2].

Однако потенциальные возможности этих культур используются далеко не полностью. Основными причинами, сдерживающими повышение урожайности, считаются низкая всхожесть, высокая восприимчивость районированных сортов к болезням и вредителям, слабая энергия прорастания семян из-за их твердокаменности. Немаловажной задачей является сохранность выращенной продукции, так как ее потери в процессе хранения из-за воздействия грибных, вирусных, бактериальных и других заболеваний могут достигать более 20%.

Для успешного преодоления отмеченных недостатков необходимо использование современных высокоэффективных технологий предпосевной подготовки посевного материала, которые обеспечивают формирование здорового и устойчивого к стрессовым факторам проростка, передачу сортовых признаков от поколения к поколению.

Известно, что особенности процесса прорастания семени и последующего развития растения обусловлены эпигенетическими механизмами клеточной активации, «запускающими» сложные многоступенчатые биохимические реакции. В частности, имеются факторы, которые определяют полноту реализации генетического потенциала семян, увеличивают их сопротивляемость к неблагоприятным условиям окружающей среды, повышают иммунитет к вирусным, бактериальным и грибковым заболеваниям. Программа развития семени, единожды «запущенная» при его прорастании, вызывает множество последовательных биохимических реакций в онтогенезе, итогом которых могут быть устойчивость растений к неблагоприятным факторам развития и повышение урожайности. Новые фундаментальные знания о механизмах, лежащих в основе способности семян не терять физиологическое качество при действии неблагоприятных условий, позволят разработать способы целенаправленного воздействия на семенной и посадочный материал.

Традиционно применяемые способы повышения всхожести – скарификация (механическое нарушение семенной оболочки для ускорения прорастания семян) и обработка семенного материала химическими веществами – достаточно трудоемки и экологически небезопасны. Поиск новых высокоэффективных методов повышения всхожести семян ведется биологами всего мира.

В последние годы отмечен положительный эффект при использовании плазменно-пучковых, микро- и радиоволновых методов обработки различных растительных объектов [3]. Так, авторами [4] выявлено повышение энергии прорастания и лабораторной всхожести семян пшеницы, кукурузы, ячменя и подсолнечника после их обработки слабыми (величина магнитной индукции $B \approx 3-15$ мТл) низкочастотными и сверхвысокочастотными магнитными полями. В работе [5] установлено улучшение

начальных ростовых процессов семян озимой пшеницы и ячменя в результате воздействия постоянного магнитного поля с индукцией $B \approx 1,5$ Тл. Стимулирование процесса прорастания семян хлопчатника, бобовых и злаковых культур обработкой переменным электрическим и магнитным полями напряженностью $E \sim 10^4$ В/м и частотой $f \approx 1$ кГц зарегистрировано в [6-8]. Особенности предпосевной обработки семян желтого люпина слабым электромагнитным излучением с частотой $10^{13} - 10^{14}$ Гц исследовались в [9]. Более расширенная библиография по электромагнитной обработке (ЭМО) семян представлена на сайте [10].

Анализ полученных результатов показывает, что эти методы могут рассматриваться в технологии промышленного возделывания сельскохозяйственных культур как альтернатива химическим и биологическим методам их предпосевной обработки.

Цель настоящей работы – изучение воздействия высокочастотного электромагнитного поля (ВЧЭМП) на посевные качества семян донника белого сорта Коптевский, эспарцета песчаного сорта Колпатский, сои сорта Вилия, люпина узколистного сорта Прывабны, галеги восточной сорта Полеская, лядвенца рогатого сорта ИзиС, клевера лугового сорта Цудойны, вики полевой сорта Удача, гороха полевого сорта Світанок.

Выбор ВЧЭМП обусловлен тем, что имеющиеся в литературе данные по ЭМО семенного материала растений получены при воздействии на образцы семян постоянных магнитных полей или же электромагнитных полей низкой ($f \in \text{Гц} \div \text{кГц}$) и сверхвысокой ($f \in \text{ГГц}$) частот с величиной индукции магнитной составляющей порядка нескольких мТл. Причем чаще всего используется сверхвысокочастотное облучение, которое проводят в ближней зоне рупорных или же диэлектрических антенн, особенностью которых является большая пространственная неоднородность плотности мощности электромагнитного поля в ближней зоне [11–12]. Образующиеся из-за интерференции падающей и отраженной от зондируемого объекта волны локальные частотно-зависимые пятна перегрева и температурные градиенты могут быть причиной возникновения различного рода артефактов. Применение электромагнитных полей в мегагерцовом диапазоне частот (ВЧ-облучение) практически лишено подобных недостатков, однако данные по их использованию для обработки семян в литературе отсутствуют.

Материал и методика исследований

Высокочастотной ЭМО подвергались крупные и выполненные семена, предварительно отсортированные с использованием электросепаратора СДЛ-1. Воздействие на семена проводилось в Институте физики им. Б.И.Степанова НАН Беларуси на экспериментальной установке, созданной на основе генератора переменного тока ВЧИ-62-5-ИГ-101 [13-14], позволяющей возбуждать электромагнитное поле на промышленной частоте $f=5,28$ МГц. Поле локализовалось в водоохлаждаемом спиралеобразном трехвитковом индукторе (рис. 1, а) с внутренним диаметром $D=80$ мм и длиной $L=90$ мм, подключенным в качестве индуктивной нагрузки к выходу генератора ВЧИ-62-5-ИГ-101.

Перед включением установки стеклянная емкость 2, заполненная семенами, устанавливалась в осевую зону индуктора 3 на диэлектрическую подставку 4. Воздействие проводилось в воздухе при атмосферном давлении по циклограмме, представленной на рис. 1, б. Длительность t_1 вывода генератора на стационарный режим генерации поля и возврата t_2 в исходное нерабочее состояние в сумме не превышала 3 с. Продолжительность t_0 стационарной стадии воздействия синусоидального магнитного поля с амплитудой 835 А/м составляла 5, 10, 15 и 20 мин.

Среднеквадратичные величины напряженности магнитной H и электрической E составляющих электромагнитного поля, существующие на оси индуктора, были определены измерителем напряженности высокочастотного поля ПЗ-15 с индикатором Я6П-110: $H \sim 590$ А/м ($B \approx 1$ мТл, с погрешностью $\sim 6\%$), $E \sim 12700$ В/м (с погрешностью $\sim 4\%$). Амплитудные значения $H^* = \sqrt{2}H$ и $E^* = \sqrt{2}E$ достигали 835 А/м ($B \approx 1,5$ мТл) и 17960 В/м соответственно, то есть величина H^* лишь в 30 раз превышала фоновую индукцию магнитного поля Земли ($B_3 \approx 0,05$ мТл). Погрешность воспроизведения режима работы генератора не превышала 0,5%. С учетом этого суммарная погрешность определения величины электромагнитного поля, действующего на образец, составляла не более 10%. Значения H и E в краевой зоне на расстоянии $\sim D/2$ от оси индуктора были оценены расчетным путем с использованием данных [15]. Для магнитной составляющей отличие от осевых значений не превышало 15%. Контроль нагрева семян в результате воздействия электромагнитного поля проводился с использованием хромель-алюмелевой термопары, измерение величины э.д.с. которой осуществлялось с помощью милливольтметра М2018, начиная с момента выключения электромагнитного поля. Было установлено, что при использованных режимах воздействия электромагнитного излучения нагрев семян отсутствует.

Посевные качества семян определяли по методике согласно ГОСТу 12038-84 [16] в аккредитованной лаборатории ГНУ «Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси». В лабораторных опытах семена проращивались в чашках Петри на увлажненной фильтровальной бумаге. Чашки Петри выдерживались в термостате при температуре 20° С. Контроль изменений посевных качеств исследуемых образцов осуществлялся ежедневно в одно и то же время суток. Энергия прорастания определялась на 3–4-й день, лабораторная всхожесть – на 7–10-й день после посева. Поперечные разрезы кожуры семени готовили на санном микротоме с замораживающим столиком, фиксировали в 96% спирте, выдерживали в смеси спирта и глицерина (1:1) по общепринятой в анатомии растений методике М.Н. Прозиной [17].

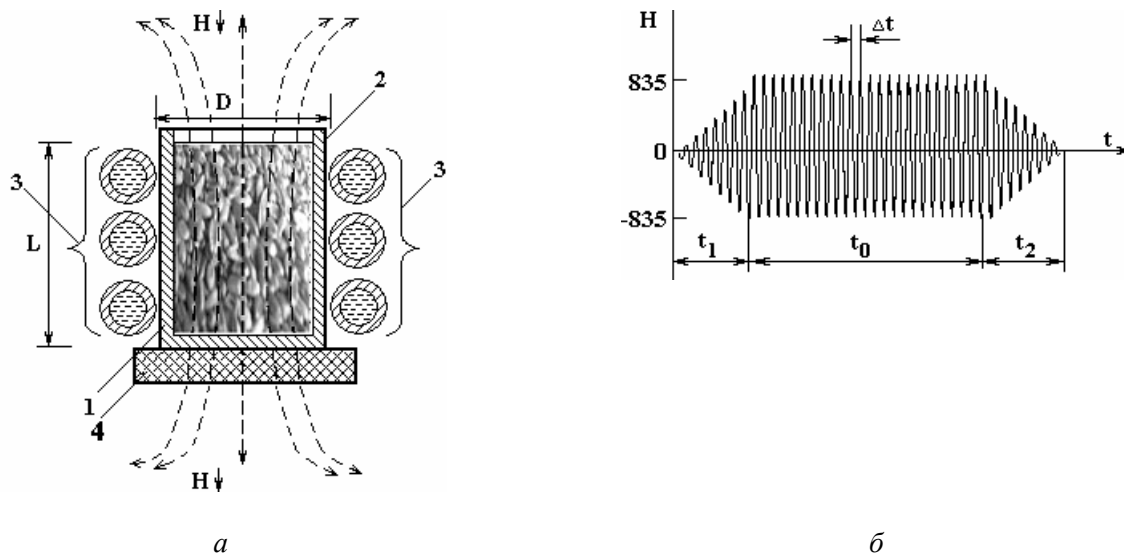


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и циклограмма (б) обработки семян в высокочастотном магнитном поле: 1 – семена; 2 – стеклянная емкость; 3 – охлаждаемый индуктор; 4 – диэлектрическая подставка

Полевые исследования проводили в течение 2008 года на дерново-подзолистой песчаной почве в ГУСП «Племзавод Мухавец» Брестского района, где контрольные и обработанные семена высевались в 4-кратной повторности. Площадь учетных делянок составляла 25 м². Морфологические особенности используемой почвы характеризовались мощным пахотным горизонтом серого цвета Ап (0–26 см), хорошо выраженным подзолисто-иллювиальным горизонтом А₂В₁ (26–49 см), а также оглеенностью горизонтов В₁g (49–94 см), В₂g (94–137 см), имеющих сизоватый цвет с обилием ржаво-охристых пятен и оглеенной породой горизонта В₃Сg (137–180 см). По степени кислотности почвы относились к нейтральным и слабощелочным (рН_{КСl} = 5,83–7,87). Содержание гумуса составляло 1,86%, подвижного фосфора – 33,44 мг/100 г почвы и калия – 21,04 мг/100 г почвы. Норма высева семян являлась общепринятой для данного региона и устанавливалась в соответствии с принятыми отраслевыми регламентами [18]: 120 шт/м² – для люпина узколистного, 500 шт/м² – для донника белого, 80 шт/м² – для сои и 300 шт/м² – для эспарцета песчаного, галеги восточной, лядвенца рогатого и клевера лугового.

Метеобстановка на протяжении 2008 года в целом отличалась от предшествующей средне-многолетней как по температурному режиму, так и по количеству выпавших осадков. Однако во время проведения полевых опытов сложившиеся погодные условия были близки к типичным для данного региона и позволили выявить сортовые и видовые особенности исследуемых культур, проследить степень их влияния на формирование продуктивности растений при оптимизации радиоволновой обработки семян. Согласно методике полевого опыта [19] были определены всхожесть, сохраняемость и выживаемость растений, осуществлены регистрация наступления и продолжительность фенологических фаз, оценены структура урожая и семенная продуктивность посевов в зависимости от режимов ЭМО.

Результаты исследований

1. Влияние высокочастотной ЭМО на изменение толщины кожуры семени бобовых культур

Накопленный многолетний сельскохозяйственный опыт показывает, что снижение полевой всхожести и соответственно урожайности бобовых культур в значительной степени связано с боль-

шой толщиной и твердостью кожуры семенного материала, затрудняющих его набухание и прорастание в почве после посева. Морфологические особенности поверхности кожуры семян семейства бобовых к настоящему времени изучены достаточно полно [20], в то время как сведения о структуре кожуры отсутствуют.

Выполненные анатомические исследования семян бобовых культур позволили установить, что их кожура многослойна, причем видовые отличия семян проявляются в различном соотношении структурообразующих слоев, толщине и характерных особенностях их строения (рис. 2). Обнаружено, что толщина кожуры семени является видовым отличительным признаком и изменяется от 0,37 мм для узколистного люпина до 0,145 мм для донника белого, а самый наружный слой кожуры образован клетками палисадного эпидермиса (пл), пересекаемого двумя слоями уплотненных клеток, которые академик Н.А. Майсурян [20] определил как световые линии (с), между которыми распределены всевозможные пигменты семени (дубильные вещества). Палисадные клетки имеют удлинненную вытянутую форму, уплотнены в средней части и у семян узколистного люпина образуют слой эпидермиса толщиной $0,16 \div 0,166$ мм. Наружная (или верхняя) их часть – суженная, с небольшим просветом между клетками, внутренняя (или нижняя) – широкопросветная. Поперек палисадных клеток кожуры семени проходят два слоя уплотненных клеток (с), делящие палисадный эпидермис на три неравные части: соприкасающуюся с кутикулой, узкую верхнюю и две нижние примерно одинаковой ширины. У донника белого толщина палисадного слоя составляет порядка $0,050 \div 0,060$ мм.

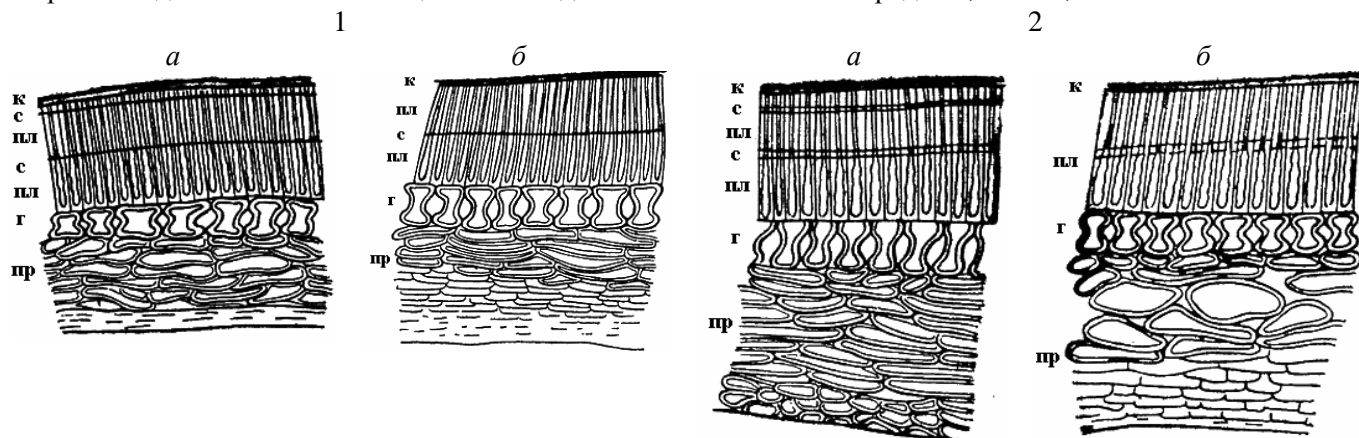


Рис. 2. Поперечный разрез кожуры семени с боковой стороны: 1 – *Lupinus angustifolius* L. сорт Прывабны, 2 – *Melilotus albus* Desr. сорт Коптевский; а – до обработки магнитным полем, б – после обработки (экспозиция – 10 мин). к – кутикула; пл – палисадная ткань; с – световая линия; г – гиподерма; пр – паренхима

Непосредственно за палисадным эпидермисом расположены клетки гиподермы (г), имеющие толщину порядка 0,045–0,050 мм у узколистного люпина и 0,030–0,035 мм – у донника. Эти клетки имеют однородно утолщенные стенки, соприкасающиеся друг с другом лишь концами, в результате чего между ними образуются большие межклетники.

Клетки гиподермы по форме несколько напоминают «песочные часы». За гиподермой располагается слой толстеной паренхимы (пр), клетки которой в незрелом семени полны питательных веществ. Этот слой соприкасается со слоем тонкостенной паренхимы, в которой проходят проводящие пучки. Кроме того, верхний, наружный слой кожуры семени образован также толстостенными клетками, сильно сплюснутыми и уплотненными. Толщина слоя клеток паренхимы у люпина варьируется в диапазоне 0,128 – 0,215 мм, у донника – 0,06 – 0,11 мм.

Изучение анатомического строения семенной оболочки семян бобовых культур, подвергнутых высокочастотной ЭМО, показало, что после воздействия верхняя световая линия либо растворялась (исчезала), либо передвигалась ближе к кутикуле. По-видимому, роль этой линии заключается в создании экранирующего защитного слоя, предотвращающего быстрое прорастание семян, так как твердость кожуры семян как эволюционно сформированный признак имеет важное биологическое значение, способствуя высокой выживаемости диких форм за счет синхронизации их жизненного цикла с условиями вегетации в экологических нишах произрастания. В процессе доместификации диких видов растений удастся получить «мягкокожурные» семена, что является положительным хозяйственным признаком. Это обеспечивает быстрое и равномерное набухание семян, дружность и равномерность их всходов, высокую продуктивность посевов.

Кроме того, в коже семян после ЭМО отмечались изменения конфигурации и размера клеток гиподермы: их объем увеличивался, и они становились менее сжатыми, толщина клеточных обо-

лочек уменьшалась. Отмечены изменения и в структуре многослойной паренхимы: все три ее слоя (первый, или наружный, – толстостенный паренхимный, второй (мелкоклеточный) – тонкостенный с проводящими пучками и третий – сходный с первым, но более сильно сдавленный) становились более рыхлыми, стенки клеток – более тонкими, проницаемыми, толщина слоя увеличивалась. По нашему мнению, обнаруженные изменения кожуры семян должны способствовать быстрому проникновению влаги и набуханию семян.

2. Влияние продолжительности высокочастотной ЭМО семян на их посевные качества и силу начального роста – лабораторные эксперименты

Одними из основных посевных показателей семян, лимитируемых Государственными стандартами (СТБ 1123-98 и СТБ 1894-2008), являются их лабораторная энергия прорастания, всхожесть и длина проростков. Для зернобобовых культур дружность всходов, быстрый рост растений и равномерное созревание семян предоставляют возможность разработки и внедрения высокоэффективных приемов борьбы с сорной растительностью, вредителями и болезнями. Эффективность проводимой в настоящей работе предпосевной ЭМО оценивалась по изменению энергии прорастания, лабораторной всхожести и длины проростков тестируемых партий семян относительно контрольных (необработанных) образцов в зависимости от продолжительности воздействия. Для получения статистически усредненных данных эксперименты проводились в двукратной повторности, при этом в каждой контрольной и обработанной партиях содержалось по 100 семян.

В результате выполненных исследований установлено, что ЭМО всех тестируемых культур обеспечивает существенное увеличение энергии прорастания, лабораторной всхожести и длины проростков семян (рис. 3).

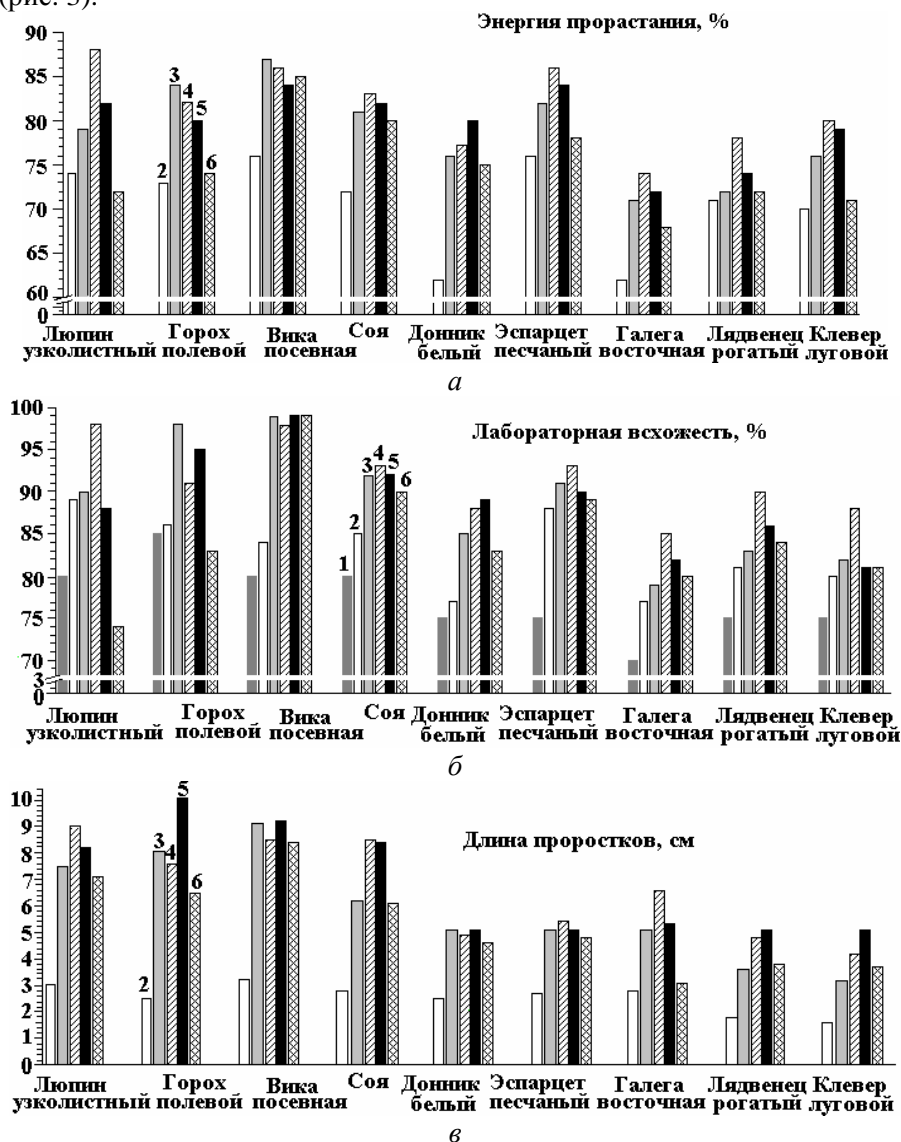


Рис. 3. Величина энергии прорастания, лабораторной всхожести и длины проростков семян в зависимости от продолжительности ЭМО

Наиболее оптимальной являлась ЭМО с продолжительностью 10–15 минут (рис. 4). Для этих экспозиций в зависимости от вида растений энергия прорастания, лабораторная всхожесть и длина проростков обработанных семян были на 5–15% выше соответствующих показателей, полученных для контрольных партий.



Рис. 4. Прорастание семян вики посевной в контрольной партии (1) и после ЭМО различной длительности: $t_0 = 5$ (2); 10 (3) и 15 мин (4)

Для сокращения затрат труда, экономии ценного селекционно-семеноводческого материала и сосредоточения внимания на изучении наиболее перспективных его форм важное значение приобретают выбор и применение эффективных способов оценки и отбора высокопродуктивных растений на ранних этапах органогенеза [21].

В проводимых исследованиях был использован метод сортовой и видовой диагностики определения потенциальной продуктивности растений ячменя и люпина, разработанный в Белорусском НИИ земледелия [22] и Белорусской государственной сельскохозяйственной академии [23]. В основу применяемой диагностики положена генетически обусловленная ростовая реакция прироста стебля на воздействие электромагнитных полей в период перехода зародышевого корня от гетеротрофного питания к аутоотрофному. С целью исключения зависимости интенсивности роста стеблей от условий выращивания обработанные и необработанные семена проращивали в рулонах из фильтровальной бумаги, равномерно их разместив по 50 штук в каждом в 4-кратной повторности. Статистический анализ результатов исследований с использованием методических данных [19] выявил положительную корреляционную зависимость (коэффициент корреляции $r=0,69-0,77$) между конечной продуктивностью и приростом центрального стебля бобовых культур на 10-й день после посева семян. Оптимальным оказалось воздействие ВЧЭМП с продолжительностью 10–15 минут.

3. Влияние продолжительности радиоволновой обработки на полевую всхожесть, сохраняемость и выживаемость растений, формирование элементов структуры урожая

Существующие в Республике Беларусь отраслевые регламенты по возделыванию сельскохозяйственных культур устанавливают оптимальные нормы их посева и соответствующую густоту стеблестоя [23]. Число стеблей на единице посевной площади и их высота определяют, с одной стороны, режим усваивания растениями фотосинтетически активной радиации (ФАР), способность накопления ими органических веществ, возможность предотвращения развития болезней и подавления роста сорных растений, минимизируют внутривидовую конкуренцию за влагу и минеральное питание, с другой – являются основным элементом, формирующим структуру урожая семян и зеленой массы зернобобовых культур.

Одним из факторов, во многом лимитирующих густоту растений и, как следствие, уровень продуктивности засеваемого земельного участка, является полевая всхожесть семян, которая в соответствии с [23] имеет тесную корреляционную связь ($r = 0,96$) с лабораторной всхожестью. Полученные результаты хорошо согласуются с данными [23]: подобно лабораторной всхожести (п. 2), полевая всхожесть растений для всех культур после ЭМО семян в течение 5, 10 и 15 минут увеличивалась и достигала 70,7–91,2% (рис. 5,а).

В процессе дальнейшего развития растений, независимо от биологических и морфологических особенностей вида, влияние ЭМО положительно сказывалось на их сохраняемости (соответствующем количеству сделанной выборке продуктивных растений) и выживаемости (общем числе растений на единице площади в предуборочный период) (рис. 5,б,в). Необходимо отметить, что степень и характер угнетения части растений, определяющих непродуктивную составляющую сохраняемости, зависели от их сортовой и видовой специфики, морфологических и биологических особенностей, метеорологических условий вегетационного периода.

По достижении растениями полной спелости семян уборку семенников трав осуществляли прямым комбайнированием. На зеленую массу однолетние бобовые культуры убирались в фазу начала плодообразования, многолетние – при двукратном скашивании в фазе цветения.

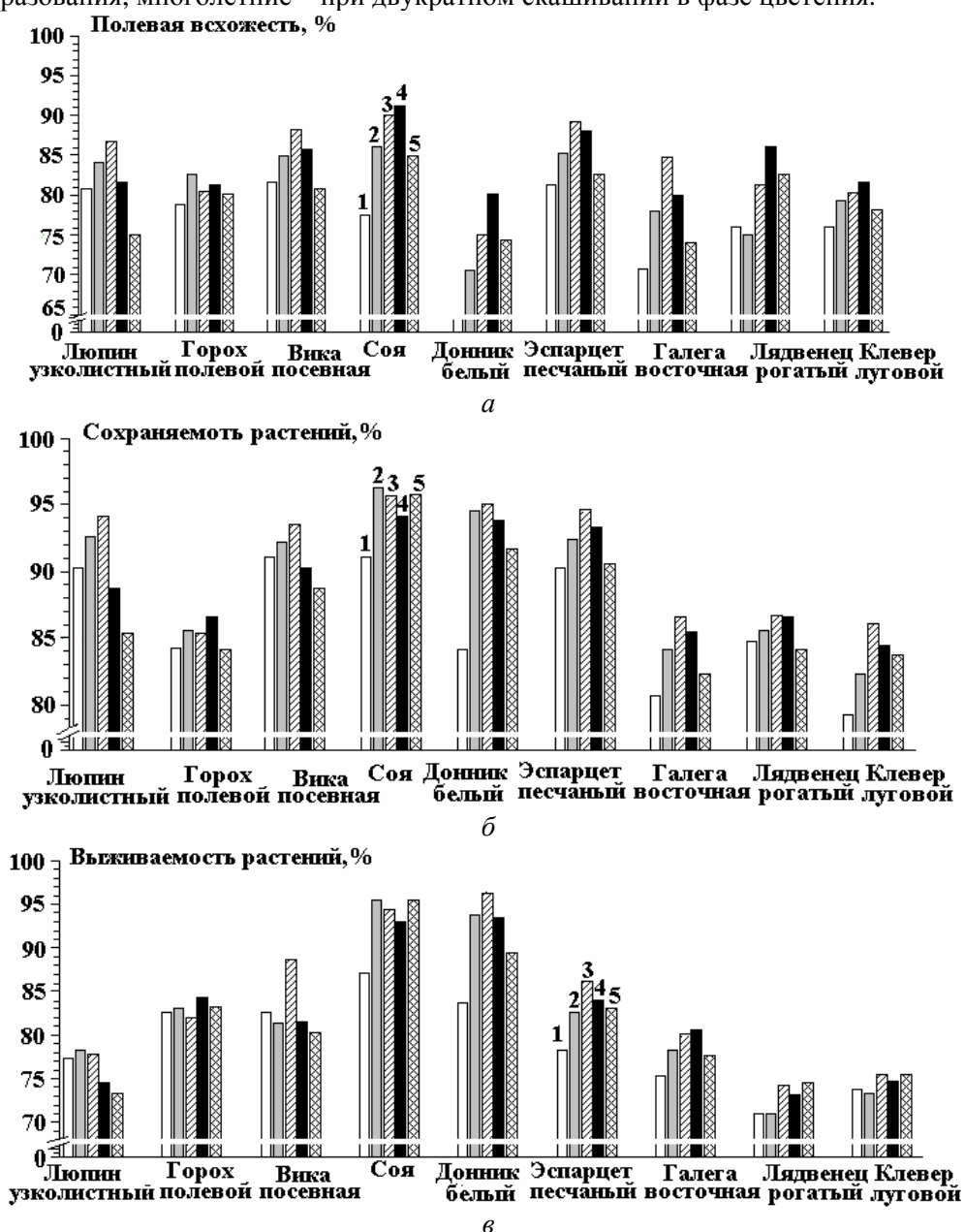


Рис. 5. Величина полевой всхожести (а), сохраняемости (б) и выживаемости (в) растений бобовых культур в зависимости от продолжительности ЭМО семян

При оценке структуры урожайности установлено (см. таблицу), что на высоту растений и количество плодоносящих побегов ЭМО семян значительного влияния не оказала. Но при подсчете бобов и семян с одного растения было замечено, что все опытные варианты имеют положительные результаты по сравнению с контролем. При этом наиболее высокая индивидуальная продуктивность растений наблюдалась при 5, 10 и 15-минутной обработке.

Приведенный в таблице критерий $НСР_{05}$ (наименьшая существенная разность измеряемых параметров при 5%-ной предельной ошибке опыта) указывает на то, что в случаях, когда фактически полученная разность между измеряемым и контрольным параметром больше $НСР_{05}$, то прибавка в урожае по сравнению с контролем существенна, и наоборот, если $НСР_{05}$ меньше, то прибавка – незначительна [19].

В целом данные по урожайности свидетельствуют о достоверно установленном преимуществе вариантов опытов, где применялась предпосевная ЭМО семян. Следует заметить, что эффективность воздействия высокочастотного электромагнитного поля на семена зависит от продолжительности «одомашнивания» того или иного вида растений: чем меньше изученный вид находится в окультуривании, тем выше эффективность ЭМО.

Влияние обработки семян высокочастотным магнитным полем на основные элементы продуктивности зернобобовых культур

Культура	Вариант опыта	Высота растений, см	Количество растений перед уборкой, шт/м ²	Урожайность, г/м ²			
				зеленой массы		зерна	
				всего	± к контролю	всего	± к контролю
Люпин узколистный	Контроль	60,2	75	2831	–	243	–
	5 мин	64,7	79	3342	+511	250	+7
	10 мин	65,0	81	3306	+475	273	+30
	15 мин	72,2	73	3455	+624	261	+18
	20 мин	58,2	66	2613	-218	226	-17
Горох полевой	Контроль	78,4	78	3037	–	197	–
	5 мин	80,3	82	3127	+90	254	+57
	10 мин	82,7	79	3392	+355	268	+71
	15 мин	84,5	82	3462	+425	272	+75
	20 мин	82,2	80	3118	+81	243	+46
Вика полевая	Контроль	76,9	134	2506	–	203	–
	5 мин	79,0	138	2642	+136	219	+16
	10 мин	80,9	157	2651	+145	227	+24
	15 мин	86,8	140	2887	+381	246	+43
	20 мин	81,3	130	2642	+136	232	+29
Соя	Контроль	60,3	54	2648	–	165	–
	5 мин	75,6	66	3012	+364	242	+77
	10 мин	77,2	68	3117	+469	267	+102
	15 мин	80,6	68	3076	+428	253	+88
	20 мин	73,9	65	3054	+406	247	+82
НСР ₀₅				382		28	
Донник белый	Контроль	104,2	249	2572	–	223	–
	5 мин	112,7	331	3114	+542	247	+24
	10 мин	126,8	361	3856	+1284	302	+79
	15 мин	135,4	375	3998	+1426	321	+98
	20 мин	118,6	333	3125	+553	250	+27
Эспарцет песчаный	Контроль	74,6	191	1919	–	357	–
	5 мин	78,9	212	2172	+253	362	+5
	10 мин	82,4	230	2808	+889	374	+17
	15 мин	81,9	222	2714	+795	370	+13
	20 мин	77,7	206	2075	+156	360	+3
Галега восточная	Контроль	88,7	160	3322	–	252	–
	5 мин	98,6	183	4045	+723	338	+86
	10 мин	110,2	204	5611	+2289	376	+124
	15 мин	100,4	193	4830	+1508	345	+93
	20 мин	95,6	172	3867	+545	307	+55
Лядвенец рогатый	Контроль	73,2	162	1572	–	154	–
	5 мин	74,2	160	1601	+29	158	+4
	10 мин	78,7	181	3303	+1731	204	+50
	15 мин	82,4	189	4145	+2573	247	+93
	20 мин	80,6	185	3622	+2050	222	+68
Клевер луговой	Контроль	68,4	168	2462	–	178	–
	5 мин	72,6	175	2713	+251	183	+5
	10 мин	76,7	182	2914	+452	218	+40
	15 мин	77,4	183	3310	+848	205	+27
	20 мин	73,4	177	2613	+151	180	+2
НСР ₀₅				337		27	

Обсуждение результатов

Несмотря на достоверно установленную биотропную активность электромагнитных полей, механизмы их стимулирующего или же ингибирующего действия на метаболизм клетки биологического объекта в настоящее время остаются малоизученными [24]. Многие исследователи связывают воздействие ЭМП на биологические объекты с вызываемым им изменением транспортных свойств клеточных плазматических мембран, играющих чрезвычайно важную роль в регулировании поступления в клетку необходимых для ее функционирования питательных веществ и вывода наружу отходов и продуктов секреции. Эффективность массообмена между клеткой и межклеточной средой определяется переносом ионов вещества через поры мембраны и зависит от размера пор, концентраций веществ, вязкости, подвижности и других материальных свойств среды по обе стороны мембраны. Как отмечено в [25–26], при воздействии ЭМП на мембрану в ней возникают акустические колебания с частотой, соответствующей частоте поля. В силу того, что мембрана поляризована, акустические колебания вызывают внутриклеточные электрические колебания протоплазмы с той же длиной волны. Имеет место и обратный механизм – электромагнитная волна вызывает в клетке электрические колебания (перемещения зарядов у поверхности мембраны), сопровождающиеся деформацией мембраны и соответственно возникновением акустических колебаний с длиной волны, равной длине электромагнитной волны в клетке. При этом в обоих случаях меняются радиус пор мембраны и, как следствие, величина ионных потоков. Кроме того, по данным [27], ЭМП приводит к разрыхлению структуры лежащей снаружи от плазматической мембраны целлюлозной клеточной стенки и очистке пор и плазодесм от закупорок, облегчая транслокацию веществ. Могут изменяться также энзиматическая активность, конформационная динамика белков, вязкость липидов [7], являющихся составными компонентами мембран и протоплазмы клетки. Отмечено также возникновение внутриклеточных магнетофоретических смещений крахмалосодержащих структур, а также цитопластических ионных токов [28–30].

Проведенные авторами [31–33] оценки резонансных акустических частот колебаний мембраны клетки показывают, что их величина лежит в диапазоне от 10^5 до 10^8 Гц. Частота применяемого ЭМП ($f=5,28$ МГц) попадает в данный частотный диапазон, т.е. можно предположить, что «мембранный» механизм воздействия является одной из причин наблюдаемых изменений агрономических свойств тестируемого семенного материала. Предложенная в [27] физическая модель отклика растительной ткани на воздействие ЭМИ, в соответствии с которой воспринимаемая энергия ЭМП вызывает увеличение внутренней энергии клетки и приводит к некоторому изобарному увеличению ее объема с последующей его фиксацией клеточными стенками и переходом к изохорному режиму восприятия, качественно объясняет результаты выполненных анатомических исследований семян.

Следует отметить, что в последние годы получила свое развитие высказанная еще в 60-х годах прошлого века гипотеза о ключевой роли, содержащейся в биологических объектах воды, в восприятии ими внешнего низкоинтенсивного ЭМП [34–37], поскольку электромагнитное излучение может влиять на слабые связи (водородные, полярные, гидрофобные), которым принадлежит ведущая роль в поддержании конформации биологических молекул и надмолекулярных структур. Через модификацию слабых взаимодействий облучение объекта может привести к изменению гидратных оболочек биологических макромолекул и физико-химических свойств мембран, к развитию процессов массопереноса и массообмена на границе раздела фаз, активности каналообразующих белков, каталитических свойств ферментов, структурным нарушениям ассоциативно-диссоциативного характера органических водных растворов и др. Факты изменения свойств воды под воздействием ЭМП, возбуждаемого в рабочей зоне индуктора применяемой установки (рис. 1), и влияния активированной воды на свойства приготавливаемых на ее основе портландцементных систем отмечены в работе [38].

Наконец, нельзя исключать и самый неопределенный уровень воздействия – информационный, когда внешний поток энергии электромагнитного поля может вызвать изменение алгоритма процессов жизнедеятельности. В этом случае действие поля накладывается на эндогенные ритмы растительных объектов, что, в зависимости от условий и характера воздействия, может привести как к стимуляции их роста, так и к его угнетению [7].

В заключение следует отметить, что выполненная оценка экономической эффективности возделывания зерна и получения зеленой массы однолетних и многолетних бобовых культур свидетельствует о несомненном преимуществе ЭМО по отношению к традиционным химическим методам, повышающей полевую всхожесть, выживаемость растений, что в конечном результате положительно влияет на индивидуальную продуктивность и урожайность изученных культур в целом.

Выводы

В результате выполненных исследований установлено:

- слабоинтенсивное высокочастотное электромагнитное поле может быть использовано в качестве медиатора рецепторов клеток семян, «запускающих» внутриклеточные механизмы, приводящие к улучшению их посевных качеств;

- ЭМО семян бобовых культур способствует снижению твердокожурности семян за счет уменьшения толщины клеточной оболочки наружного слоя и повышения влагопроницаемости семян при прорастании;

- предпосевная ЭМО семян однолетних и многолетних бобовых культур в течение 5, 10 и 15 минут положительно влияет на повышение лабораторной и полевой всхожести, выживаемости, урожайности зерна и зеленой массы;

- наблюдаемые проявления воздействия ЭМП на семена бобовых культур можно связать с вызываемым им изменением транспортных свойств клеточных плазматических мембран.

Отмечено повышение рентабельности производства при обработке семян зернобобовых культур электромагнитным излучением по сравнению с контрольной партией.

Работа выполнена при совместной финансовой поддержке Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь и Брестского областного исполнительного комитета в рамках проекта Б08Б-005 регионального конкурса проектов фундаментальных научных исследований по проблемам Брестской области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Государственная программа возрождения и развития села на 2005-2010 гг. Минск. 2005. 6 с.
2. Шик А.С. Адаптивные технологии выращивания узколистного и желтого люпина в условиях Брестского Полесья // Зборнік навуковых прац «Прыроднае асяроддзе Палесся: асаблівасці і перспектывы развіцця». Брэст. 2006. Т.1. С. 163–168.
3. Кутепов А.М., Захаров А.Г., Максимов А.И. Вакуумно-плазменное и плазменно-растворное модифицирование полимерных материалов. М.: Наука, 2004. 496 с.
4. Калинин Н.Г., Бошкова И.Л., Панченко Г.И., Коломийчук С.Г. Влияние низкочастотного и высокочастотного электромагнитного поля на семена // Биофизика. 2005.Т.50. Вып. 2. С. 361–365.
5. Еськов Е.К., Дарков А.В., Швецов Г.А. Зависимость магнитной восприимчивости различных объектов от их физиологического состояния и жизнеспособности // Биофизика. 2005.Т.50. Вып.2. С. 357–360.
6. Герасимов И.В. Стимулирование процесса прорастания семян хлопчатника обработкой излучением разряда униполярного пробоя газа (УПГ) //Электронная обработка материалов. 1993. № 6. С. 54–56.
7. Penuelas J., Llusia J., Martínez B. Diamagnetic Susceptibility and Root Growth Responses to Magnetic Fields in *Lens culinaris*, *Glycine soja*, and *Triticum aestivum* // *Electromagnetic Biologu and Medicine*. 2004. V. 23. No. 2. P. 97–112.
8. Gorchakov A.M., Tereshko I.V., Gorchakova F.A., Abidzina V.V., Elkin I.E. Influence low-energy ion irradiation in glow discharge plasma on biological objects // *Abstr. of 14 th Int. Conf. «Surface Modification of Material by Ion Beams»*, 04–09 September 2005, Kusadasi, Turkey. P. 267.
9. Тарануха В.Г., Лазарь Н.Г. Влияние предпосевной обработки семян слабым электромагнитным излучением на урожайность желтого кормового люпина // Сб. научн. тр. «Селекция зерновых и бобовых культур на стабильность урожайности, иммунитет и качество зерна». Горки. 1996. С. 51–53.
10. <http://rushitech.polymixweb.com/embib.htm>
11. Бецкий О.В., Петров И.Ю., Тяжелов В.В. Распределение электромагнитного поля миллиметрового диапазона в модельных и биологических тканях при облучении в ближней зоне излучателя // ДАН СССР. 1989. Т.309. №1. С. 230–233.
12. Khizhnyak E.P., Ziskin M.C. Heating patterns in biological tissue phantoms caused by millimeter wave electromagnetic irradiation // *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 1994. V.41(9). P.865–873.
13. Городецкая Е.А., Спиридович Е.В., Корево И.А., Ажаронок В.В., Филатова И.И., Некрашевич Я.И. Влияние плазменно-радиоволновой обработки на посевные качества семян // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2007. Т.51. №6. С. 256–262.
14. Здор Г.Н., Анисович А.Г., Шиманович В.Д., Ажаронок В.В., Дресвин С.В. Трансформация структуры и свойств бериллиевой бронзы под воздействием высокочастотного магнитного поля // Известия РАН, Металлы. 2003. № 4. С.100–105.
15. Монтгомери Д.Б. Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов. М.: Мир, 1971. 354 с.

16. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. ГОСТ 12038–84. 18 с.
17. *Прозина М.Н.* Ботаническая микротехника. М.: Высшая школа, 1960. 203 с.
18. *Гусаков В.Г.* Организационно-технологические нормативы возделывания сельскохозяйственных культур // Сб. отраслевых регламентов. Минск. Бел. наука, 2005. 460 с.
19. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта с основами статистической обработки результатов исследований. М.: Агропромиздат, 1985. 346 с.
20. *Майсурия Н.А., Атабекова А.И.* Люпин. М.: Колос, 1974. 463 с.
21. *Шевлуха В.С., Прыгун М.А., Гриб С.И.* Способы отбора высокопродуктивных растений ячменя на первом этапе органогенеза // Методические указания. М. 1985. 8 с.
22. *Шик А.С.* Изучение исходного материала и создание скороспелых, фузариозоустойчивых сортов люпина желтого. Автореф. дис. канд. с.-х. наук. Горки, 1988. 16 с.
23. *Козлов А.А.* Урожайность и качество зерна новых сортов люпина узколистного в зависимости от сроков сева и норм высева. Автореф. дис. канд. с.-х. наук. Жодино, 2008. 20 с.
24. *Бинги В.Н., Савин А.В.* Физические проблемы действия слабых магнитных полей на биологические системы // Успехи физических наук. 2003. Т. 173. № 3. С. 265–300.
25. *Голант М.Б.* К вопросу о механизме возбуждения колебаний в клеточных мембранах слабыми электромагнитными полями // Сб. науч. тр. «Применение миллиметрового излучения низкой интенсивности в биологии и медицине». М., 1985. С.127–131.
26. *Голант М.Б., Сотников О.С.* Об ультраструктурном обеспечении электромагнитной связи в системах живых клеток // Сб. науч. тр. «Медико-биологические аспекты миллиметрового излучения». М., 1987. С. 131–137.
27. *Калинин Л.Г., Бошкова И.Л.* Физическая модель отклика растительной ткани на воздействие микроволнового электромагнитного поля // Биофизика. 2003. Т.48. Вып.1. С.122–124.
28. *Kuznetsov O.A., Hasenstein K.H.* Magnetophoretic Induction of Root Curvature // *Planta*. 1996.V. 198. P. 87–94.
29. *Kuznetsov O.A., Shwucho W.J., Sack F.D., Hasenstein K.H.* // *Plant Physiol*. 1999.V. 119. P. 645–650.
30. *Waisenseel M.H., Becker H.F., Ehlgotz J.G.* // *Plant Physiol*. 1992. V. 100. №1. P. 16–25.
31. *Шеин А.Г.* Некоторые результаты изучения воздействия низкоинтенсивного СВЧ-излучения на биологические объекты // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2007. №2-4. С.80–85.
32. *Шеин А.Г., Харланов А.В., Никулин Р.Н.* Расчет акустических колебаний клетки // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2005. № 3. С.18–25.
33. *Шеин А.Г., Харланов А.В.* Поперечные акустические колебания клетки и влияние на нее электромагнитных волн низкой интенсивности // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2006. №4. С.15–20.
34. *Лященко А.К.* Структура воды, миллиметровые волны и их первичная мишень в биологических объектах // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2007. № 8–9. С. 62–76.
35. *Оганисян А.О., Калантарян В.П.* Стимулирующее и ингибирующее воздействие воды, облученной ЭМИ миллиметрового диапазона, на прорастание семян и рост ячменя // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2008. № 5. С. 64–66.
36. *Бецкий О.В.* Пионерские работы по миллиметровой электромагнитной биологии, выполненные в ИРЭ РАН // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2003. № 8. С.11–20.
37. *Горленко Н.П.* О механизме активации биологических объектов магнитным полем // Биофизика. 2006. Т.51. Вып. 4. С.767–768.
38. *Ажаронок В.В., Белоус Н.Х., Родцевич С.П., Кошевар В.Д., Гончарик С.В., Чубрик Н.И.* Высоко-частотная магнитно-импульсная обработка воды как способ улучшения технологических свойств мелкозернистых бетонов // Инженерно-физический журнал. 2009 (в печати).

Поступила 16.04.09

Summary

The effect of low intensity radio-wave (5.28 MHz) electromagnetic field on seeds of annual and perennial legumes has been investigated. It has been shown that the pre-sowing electromagnetic seeds treatment with duration of 10–15 min contributes to their laboratory and arable germination enhancement, survival, crop capacity increase and it can be considered as a mediator of seeds' cell receptors that initiate intracellular mechanisms which lead to improvement of seed sowing quality.