

Обработка семян зерновых культур в низкочастотном электромагнитном поле

Алексей Семенович Дорохов¹,
академик РАН, доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: dorokhov.vim@yandex.ru;
Михаил Евгеньевич Чаплыгин¹,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: misha2728@yandex.ru;
Александр Геннадьевич Аксенов¹,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: 1053vim@mail.ru;

Людмила Сергеевна Шибряева^{1,2},
доктор химических наук, профессор,
e-mail: lyudmila.shibryaeva@yandex.ru;
Никита Дмитриевич Блинов^{1,2},
инженер, младший научный сотрудник,
e-mail: nik.blinov76@gmail.com;
Андрей Сергеевич Чулков¹,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: andrei.chulkov@mail.ru;
Алексей Викторович Подзоров¹,
научный сотрудник,
e-mail: alexvp900@yandex.ru

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация;

²Институт биохимической физики имени Н.М. Эмануэля РАН, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отмечена возможность повышения продуктивности семян путем воздействия на них электромагнитного поля. Рассмотрены теоретические и практические предпосылки создания экспериментальной лабораторной установки для предпосевной обработки семян низкочастотным электромагнитным полем и достижения магнитобиологического эффекта. (*Цель исследования*) Изучить влияние низкочастотного электромагнитного поля на состав и свойства семян зерновых культур. (*Материалы и методы*) Применялись стандартные излучатели с вариативностью магнитной индукции 3-75 миллитесла, частотой излучения 1-100 Герц, обеспечивающие требуемые параметры воздействия на партию семян. (*Результаты и обсуждение*) Исследовали влияние магнитного воздействия на всхожесть, энергию прорастания, физико-химические свойства семян при варьировании параметров низкочастотного электромагнитного поля. Проведен анализ зависимости качества воздействия от параметров работы установки и массы семян различных зерновых культур от 10 до 500 г. На этой основе выбраны режимы и создана рабочая программа облучения, обеспечивающая высокую эффективность воздействия на показатели всхожести, прорастания и развития семян. (*Выводы*) Изучено влияние низкочастотного электромагнитного поля на состав и свойства зерна. Разработана экспериментальная лабораторная установка с источниками низкочастотного электромагнитного поля, обоснованы режимы излучения. Магнитобиологический эффект предпосевной обработки промышленной партии зависит от вида и сорта культуры, активации в клетке биологического комплекса, инициирующего развитие проростка, качества и влажности семян, наличия на поверхности микроорганизмов, в том числе патогенных, источников и энергетических параметров облучения. Определены параметры низкочастотного электромагнитного поля: магнитная индукция от 3 до 75 миллитесла, частота 10-16 Герц, масса семян от 10 до 500 граммов. Эти параметры будут использованы при создании промышленной установки для подготовки семенного материала и улучшения его посевных свойств.

Ключевые слова: зерновые культуры, низкочастотное электромагнитное поле, лабораторная установка, облучение семян, магнитобиологический эффект, всхожесть семян, энергия прорастания семян.

■ **Для цитирования:** Дорохов А.С., Чаплыгин М.Е., Аксенов А.Г., Шибряева Л.С., Блинов Н.Д., Чулков А.С., Подзоров А.В. Обработка семян зерновых культур в низкочастотном электромагнитном поле // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №4. С. 4-11. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-4-4-11. EDN: SLKEWQ.

Grain Seed Treatment by a Low-Frequency Electromagnetic Field

Alexey S. Dorokhov¹,
member of the Russian Academy of Sciences,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: dorokhov.vim@yandex.ru;

Mikhail E. Chaplygin¹,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: misha2728@yandex.ru;

Alexander G. Aksenov¹,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: 1053vim@mail.ru;

Lyudmila S. Shibryaeva^{1,2},
Dr.Sc.(Eng.), professor,
e-mail: lyudmila.shibryaeva@yandex.ru;

Nikita D. Blinov^{1,2},
engineer, junior researcher,
e-mail: nik.blinov76@gmail.com;

Andrey S. Chulkov¹,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: andrei.chulkov@mail.ru;

Alexey V. Podzorov¹,
researcher,
e-mail: alexvp900@yandex.ru

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation;

²Emanuel Institute of Biochemical Physics of RAS, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper notes the potential for enhancing seed productivity through exposure to an electromagnetic field. It touches upon both theoretical and practical considerations for developing an experimental laboratory plant for pre-sowing seed treatment using a low-frequency electromagnetic field and aiming to achieve a magnetobiological effect. (*Research purpose*) The study aims to investigate the influence of low-frequency electromagnetic field on the composition and properties of grain seeds. (*Materials and methods*) Standard emitters, characterized by a magnetic induction variability of 3-75 millitesla and a radiation frequency of 1-100 Hertz, were employed to ensure the necessary treatment parameters for a batch of seeds. (*Results and discussion*) The study investigates the impact of magnetization on the germination process, germination energy, and the physical and chemical properties of seeds subjected to different parameters of a low-frequency electromagnetic field (ranging from 3 to 75 millitesla in magnetic induction and a radiation frequency of 10-16 Hertz). The quality of the effect was analyzed with respect to the installation parameters and seed mass, ranging from 10 to 500 grams, across various cereal crops. Subsequently, specific modes were identified, and a functional irradiation program was devised to ensure a highly effective impact on seeds, optimizing their germination, sprouting and development. (*Conclusions*) The impact of a low-frequency electromagnetic field on the composition and properties of grain has been studied. An experimental laboratory plant with sources of a low-frequency electromagnetic field has been developed and irradiation modes have been justified. The pre-sowing treatment of an industrial batch, the magnetobiological effect is contingent upon several factors, including the crop type and variety, activation of a biological complex in a cell that initiates the development of a seedling, seed quality and moisture content, the presence of microorganisms on the surface, pathogenic ones included, and the characteristics of irradiation sources and energy parameters. The parameters of the low-frequency electromagnetic field were determined as follows: magnetic induction ranging from 3 to 75 millitesla, a frequency 10-16 Hertz, and seed weight varying from 10 to 500 grams. These identified parameters will be applied in the development of an industrial unit designed for the preparation of seed material and enhancement of its sowing properties.

Keywords: cereal crops, low-frequency electromagnetic field, laboratory plant, seed irradiation, magnetobiological effect, seed germination, seed germination energy

■ For citation: Dorokhov A.S., Chaplygin M.E., Aksenov A.G., Shibryaeva L.S., Blinov N.D., Chulkov A.S., Podzorov A.V. Obrabotka semyan zernovykh kul'tur v nizkochastotnom elektromagnitnom pole [Grain seed treatment by a low-frequency electromagnetic field]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N4. 4-11 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-4-4-11. EDN: SLKEWQ.

Технологии повышения продуктивных свойств семян зерновых культур путем электромагнитного воздействия и поиск соответствующих технических решений направлены на переход к высокопродуктивному и экологически чистому агрохозяйству, внедрение систем рационального применения средств защиты возделываемых культур, хранение и эффективную переработку сельскохозяйственного сырья, выпуску безопасных и качественных продуктов питания.

С середины 1950-х годов специалисты в СССР, США, Канаде, Франции весьма интенсивно исследовали условия для достижения надежной и стабильной активации генетического и физиологического по-

тенциала растений [1]. Первыми стали применять на практике электромагнитные установки в промышленных масштабах для обработки посевного материала сельхозпроизводители Канады. В 1970 году в провинции Альберта, одном из основных регионов-производителей зерновых этой страны, более 20 тыс. га сельхозугодий были засеяны семенами, которые предварительно подвергали электромагнитному воздействию [2].

В разных регионах СССР также на десятках тысячах гектарах полей апробировалось выращивание семян, обработанных электромагнитными волнами. При низких затратах на стимуляцию процесса прорастания семян урожайность зерновых культур (пше-

ница, рожь, ячмень, овес, кукуруза) повысилась в среднем на 10-12% (максимально на 18-26%) и овощей (капуста, свекла, морковь, редис, огурцы, томат) – на 18-23% (максимально на 40-60%). Отмечалось улучшение показателей качества, в частности, повышение содержания клейковины в зерне, масла в семенах подсолнечника, сахаристости сахарной и кормовой свеклы [3].

В постсоветский период в странах СНГ продолжились исследования по электромагнитному облучению семян сельскохозяйственных, кормовых, лекарственных и других растений [4]. Сотрудники Белорусского государственного университета изучали вопросы предпосевной обработки семян кукурузы в электромагнитном поле СВЧ-диапазона, влияния резонансных частот на ростовые процессы и их регуляцию в корнях и проростках [5]. В Могилевском государственном университете продовольствия, НИЭИ Министерства экономики Республики Беларусь, Белорусской государственной сельскохозяйственной академии занимались разработкой оборудования для стимулирования СВЧ-полями семян моркови [6]. В научных публикациях в качестве объектов электромагнитной обработки указаны семена зерновых, таких как ячмень (в 28% рассмотренных статей), пшеница (28%), овощных культур (12%), кукурузы (6%), подсолнечника (6%), сорго (4%), зернобобовых культур (4%), гречихи, льна-долгунца и ряд других [7].

Цель исследования: изучить влияние низкочастотного электромагнитного поля на состав и свойства зерна злаковых культур.

Материалы и методы. Источником низкочастотного электромагнитного поля служили стандартные излучатели российского производства с вариативностью магнитной индукции 3-75 мТл и частотой излучения 1-100 Гц, которые обеспечивают требуемые параметры воздействия на семена зерновых культур. Методы исследования базируются на теоретических основах электротехники, теории планирования эксперимента и математической статистики. Качественный и количественный состав семян, содержание в них гликозидных связей определяли методом спектроскопии в ближней инфракрасной области. Всхожесть и энергию прорастания семян оценивали по методике ГОСТ 12038-84 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести».

Предпосылки создания установки. Поиск и разработкой технологических и технических решений по воздействию электромагнитных волн на сельскохозяйственные культуры занимались российские специалисты. В Рязанском государственном агротехнологическом университете имени П.А. Костычева семена перед посевом обрабатывали в магнитном поле напряженностью 50 Эрстед на магнитном модуле [8]. Эксперименты по влиянию градиентного магнитного поля на активизацию процессов водопоглощения зерна пше-

ницы сорта *Башкирская* проводились на базе Башкирского государственного аграрного университета [9].

В Азово-Черноморской государственной агроинженерной академии с использованием технических конструкций определяли режимы предпосевной обработки семян ячменя сорта *Виконт* постоянным магнитным полем (д-р техн. наук Н.В. Ксёэнз, канд. техн. наук И.Г. Сидорцов). Изменяя расстояние между магнитами, создавали магнитное поле различной напряженности. Кассеты первой установки состояли из двух зон постоянных магнитов шириной соответственно 12 и 25 мм, индукцией магнитного поля 75 и 85 мТл 35, градиентом магнитного поля 2,06, 1,52, 1,34 Тл/м вдоль осей Y, X_1, X_3 [10]. Кассеты второй установки состояли из двух зон магнитов шириной 15 и 80 мм, индукцией 100 и 110 мТл, градиентом магнитного поля вдоль осей Y, X_1, X_3 соответственно 1,71, 1,662, 1,57 Тл/м [11].

На базе Азово-Черноморского инженерного института-филиала Донского государственного аграрного университета изготовили экспериментальный соленоид из обмоточного провода ПЭТВ диаметром голого провода 1,5 мм, сечением 1,77 мм с числом витков 103. Питание соленоида осуществлялось током переменного напряжения 4-6 В частотой 5 Гц. Индукция магнитного поля внутри соленоида изменялась от 55 до 70 Тл/м [12]. Соленоид без сердечника служит самым простым устройством для магнитной обработки семян, внутри которого относительно однородная напряженность магнитного поля. Если на обмотку подать переменное напряжение заданной частоты, то на помещенный внутрь семенной материал будет воздействовать переменное магнитное поле.

Создание лабораторной установки в Федеральном научном агроинженерном центре ВИМ. Совместно с Казахским национальным аграрным исследовательским университетом и Институтом биохимической физики имени Н.М. Эммануэля РАН изучали влияние низкочастотного электромагнитного поля разной интенсивности и продолжительности облучения на энергию прорастания, всхожесть семян и биометрические показатели развития растений яровой пшеницы в условиях фитотрона [13, 14]. Эти исследования показали положительное влияние магнитного воздействия на отдельные (штучные) образцы зерна и проявление эффекта магниторецепции. Однако в промышленных условиях на больших партиях зерна подобные работы не проводились.

Условия воспроизводимости результатов и эффективности низкочастотного электромагнитного излучения зависят от режима облучения семян. При выборе режима облучения учитывают:

- вид и сорта обрабатываемой культуры, качество и влажность семян, их обсемененность микроорганизмами, в том числе патогенными;
- содержание в клетке биологического комплекса исследуемого сорта;

- назначение применяемых приборов;
- источники облучения и энергетические параметры.

Биологическое воздействие электрического поля зависит от напряженности, амплитудного значения плотности, частоты и формы тока, времени экспозиции. Суммарный эффект является сложной функцией перечисленных факторов и сочетаний для каждого объекта [15]. С учетом опыта использования конструкций низкочастотных излучателей при определении параметров и режимов работы, оптимальных для достижения магнитобиологического эффекта, необходимо подобрать тип энергетического воздействия, который был бы воспринят зерновками на клеточном уровне [16]. Предварительно установлено в лабораторных и полевых условиях, что для семян зерновых культур такое воздействие оказывает низкочастотное электромагнитное поле с индукцией от 3 до 75 мТл и частотой 10-16 Гц [17].

Результаты и обсуждение. Для лабораторной установки выбраны источники низкочастотного электромагнитного поля [18]. На ней проводили облучение зерна с целью стимуляции биофизических и биохимических свойств, получения высоких устойчивых урожаев и потребительских качеств зерна при хранении [19].

Лабораторная установка (рис. 1) состоит из прямоугольного корпуса, разделенного на ячейки, с панелью излучателей, блока управления, таймера, набора 24 пробоборников, градуированных по высоте заполнения (рис. 2).



Рис. 1. Лабораторная установка с блоком управления источниками излучения и панелью излучателей низкочастотных электромагнитных волн: а – 3D-модель установки; б – магнитотерапевтический прибор

Fig. 1. Laboratory plant with a control unit radiation source and a panel of emitters for low-frequency electromagnetic waves: а – 3D model of the plant; б – magnetotherapy device

Установка создана на основе Патента РФ на изобретение № RU 2804114 С1 «Лабораторная установка для облучения семян или зерна низкочастотным электромагнитным излучением». Базовым компонентом оборудования являются излучатели низкочастотного магнитного поля российского производства.

Панель излучателей состоит из четырех гибких линеек, в каждой шесть последовательно соединенных излучателей. Панель расположена на дне корпуса. На каждый излучатель устанавливают пробоборники – стаканы толщиной 2-3 мм, дно примерно



Рис. 2. 3D-модель пробоборника (а) и набор пробоборников со слоем зерна от 2 до 18 см (б)

Fig. 2. 3D model of a sampler (а) and a set of samplers with a grain layer from 2 to 18 cm (б)

такого же размера, как излучатель, высота 18 см. Стаканы изготовлены из прозрачного полипропилена, не препятствующего проникновению магнитных волн.

Согласно методике эксперимента в каждый пробоборник загружают определенный объем зерна и устанавливают в ячейки на излучатели. На блоке управления задается оптимальный по времени и энергии магнитного поля режим облучения индивидуально для вида и сорта зерна, толщины слоя семян в каждом пробоборнике. Высота насыпного слоя может быть до 18 см. В блоке питания создается напряжение, необходимое для работы панелей излучателей. По истечении заданного времени каждый излучатель автоматически отключается.

Исследовали пять сортов озимой и яровой пшеницы и три сорта озимого и ярового ячменя. Применялись методы, базирующиеся на теоретических основах электротехники, теории планирования эксперимента, методах теории вероятности и математической статистики [20].

Продолжительность электромагнитного воздействия (T) составляла 10, 20, 30 и 40 минут при интенсивности мощности (магнитная индукция) 10 мТл, частоте 16 Гц. Интенсивность регулировалась высотой слоя облучаемых семян, равной 0,3 и 1,5 см. Контрольным опытом служил образец зерна без электромагнитной обработки.

Поглощаемая зерном мощность, которая необходима для повышения всхожести и энергии прорастания (полезная мощность), значительно ниже, чем теоретически рассчитана для лабораторной установки. Однако из-за особенностей конструкции при увеличении слоя облучаемого зерна соотношение теоретической мощности и полезной снижается. Мощность внешнего излучателя при толщине слоя 0,3 см составляла 10 мТл, а в слое 1,5 см – 8 мТл.

Семена для проращивания помещали в стерильные чашки Петри с двойным слоем увлажненной фильтровальной бумаги (по 100 семян на чашку) и термостатировали при 20°C. На третьи сутки определяли энергию прорастания, на седьмые сутки – лабораторную всхожесть в соответствии с ГОСТ 12038–84. Проростки зерна оценивали по основным морфометрическим параметрам (длина и количество корней, длина побега, масса корней и побегов). Измерения проводили в четырехкратной повторности.

В сравнении с контролем выявлена тенденция постепенного увеличения энергии прорастания и лабораторной всхожести семян при продолжительности магнитного воздействия от 10 до 30 минут, а затем снижения. Установлена зависимость этих показателей от высоты слоя облучаемого семян. Наибольшая энергия прорастания семян яровой пшеницы (82,4-82,6%) зафиксирована при высоте облучаемого слоя 0,3 см и экспозиции от 20 до 30 минут. У ярового ячменя при аналогичных параметрах наибольшая энергия прорастания составила 62,7-62,8%. Эти значения превышали контрольные образцы пшеницы на 5,1-5,5%, ячменя – на 3,8-4,0%.

Определение магнитобиологического эффекта.

Влияние электромагнитного поля на семена зерновых заключается в запуске и ускорении ферментативных процессов, которые обуславливают развитие растения. Магнитобиологический эффект исследовали по изменению содержания гликозидных связей (в данном случае связей углерода и кислорода C-O-C) в макромолекулах крахмала и жира. Это основные запасные вещества клетки зерна, которые расщепляются до низкомолекулярных аминокислот, других простых соединений и участвуют в биосинтезе и образовании тканей и частей уже нового растения.

Содержание гликозидных (-GH) связей определяли на БИК-анализаторе FOSS NIRS DS2500 и наблюдали за динамикой содержания GH-связей в течение 22 дней в образцах семян, облученных в слое различной высоты (рис. 3).

Процесс ферментативного гидролиза крахмала в

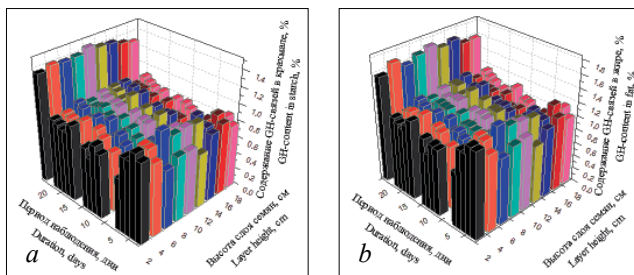


Рис. 3. Содержание гликозидных связей (-GH) : а – в крахмале; б – в жире

Fig. 3. Glycosidic bonds (-GH) content: a – in starch; b – in fat

семенах с образованием продуктов биохимических превращений и активизации ферментов, инициирующих появление проростка, стабилизируется на 7-9 день после облучения семян. Для жира стабилизация процесса также происходит за этот период. При обработке большой массы зерна (высота слоя 14-18 см)

содержание гликозидных связей в крахмале становится наименьшим к 17-20-му дню. Чтобы содержание гликозидных связей в аминокислотах, необходимых для развития корневого зародыша и стебелька, было наибольшим, высота слоя облучаемой партии зерна должна быть 14 см. Оптимальная высота слоя (расстояние от излучателей) составляет 15 см.

Выводы

1. Изучено влияние низкочастотного электромагнитного поля и ранее обнаруженных эффектов магнитобиологических воздействий на состав и свойства семян зерновых культур. Обосновано применение режимов облучения: магнитная индукция от 3 до 75 мТл, частота 10-16 Гц.

2. В случае облучения пшеницы интенсивностью 10 мТл, частотой 16 Гц на протяжении 25 минут:

- увеличение содержаний гликозидных связей, отражающий процесс биохимического преобразования крахмала и жира в вещества, необходимые для прорастания зерна, стабилизируется на 7-9-й день после облучения семян. При обработке большой массы зерна (слой 14-18 см) содержание гликозидных связей становится наименьшим к 17-20-му дню;

- для достижения максимального содержания гликозидных связей в аминокислотах и других веществ, необходимых для развития корневого зародыша и стебелька, наибольшая высота слоя при облучении партий зерна должна быть 14 см. Оптимальная высота слоя (расстояние от излучателей) равна 15 см.

3. Несмотря на многочисленные исследования, в том числе выполненные на созданной установке, проблема стимулирующего действия физических факторов для разработки программы высокоэффективного омагничивания семян разной массы требует дополнительного изучения. Например, для выявления особенностей неспецифической биологической реакции стимуляции роста и развития высших растений на действие слабых физических факторов (температуры и влажности).

Результаты испытаний могут быть взяты за основу при создании промышленной установки.

Работа выполнена на средства гранта по Соглашению № 075-15-2022-1210 от 07.10.2022 с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках гранта по теме «Разработка технологий и оборудования для улучшения продуктивных свойств семян зерновых культур путем электромагнитного воздействия».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сорокопудова О.А., Донецких В.И., Долганова З.В. Стимуляция всхожести семян *Iris Ensata Thunb.* магнитными импульсами с изменяемой частотой // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация.* 2016. N2. С. 98-101.
2. Grigorieva E., Shulga P. Agricultural development in the Ca-

- nadian Prairies. *International agricultural journal*. 2022. N5. 441-449. DOI: 10.55186/25876740-2022-6-5-28.
3. Шаршунов В.А., Червяков А.В., Курзенков С.В., Циркунов А.С. Оборудование для предпосевного стимулирования семян СВЧ-полем // *Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения*. 2011. N1(10). С. 5-10. EDN: VBFGBZ.
 4. Alchimbayeva S., Zhalnin E.V., Sadykov Z.S., et al. The processing of seeds of spring wheat by low frequency electromagnetic field in an industrial environment. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019. Vol. 7. N6. 1057-1061. EDN: VQZECG.
 5. Пушкина Н.В. Влияние предпосевной обработки семян электромагнитным полем сверхвысокочастотного диапазона на структурно-функциональное состояние проростков кукурузы // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016. 4 (46). Ч. 5. С. 32-34. DOI: 10.18454/IRJ.2016.46.265.
 6. Антипкина Л.А., Левин В.И., Борычев С.Н. и др. Использование градиентного магнитного поля в предпосевной обработке семян огурца // *Агрэкоинфо*. 2022. N1. DOI:10.51419/202121123.
 7. Каримтаева Т., Оразбай А., Ишмуратова М.Ю. Оценка биомассы проростков зерновых культур после обработки лазером // *Актуальные проблемы современности*. 2020. N4(30). С. 162-167. EDN: NOHAVV.
 8. Шогенов Ю.Х., Романовский Ю.М., Измайллов А.Ю., Миронова Е.А. Реакции растений на локальное электромагнитное излучение в широком диапазоне длин волн // *Техника и оборудование для села*. 2018. N2. С. 27-30. EDN: YTYUPY.
 9. Козырский В.В., Савченко В.В., Синявский А.Ю. Предпосевная обработка семян зернобобовых культур в магнитном поле // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. N1. С. 21-26. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-13-1-21-26. EDN: YWZJNR.
 10. Кутырёв А.И., Хорт Д.О., Филиппов Р.А., Ценч Ю.С. Магнитно-импульсивная обработка семян земляники садовой // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N5. С. 9-15. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-11-5-9-15. EDN: ZSLLGN.
 11. Ахметшин А.Т., Атнагулов Д.Т., Мухамедьянова Т.К. Экспериментальное исследование влияния обработки семян пшеницы магнитным полем на их водопоглощение // *АПК России*. 2020. N2. С. 245-249. EDN: WENYOA.
 12. Кулешов А.Н., Ерешко А.С., Хронюк В.Б. Применение магнитных полей постоянных магнитов для предпосевной обработки семян ячменя // *Вестник аграрной науки Дона*. 2011. N1(13). С. 95-100. EDN: RDPTTL.
 13. Левина Н.С., Тертышная Ю.В., Бидей И.А. и др. Посевные качества семян мягкой яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) при разных режимах воздействия низкочастотным электромагнитным полем // *Сельскохозяйственная биология*. 2017. Т. 52. N3. С. 580-587. DOI: 10.15389/agrobiology.2017.3.580rus.
 14. Alchimbayeva A.S., Shibryaeva L.S., Zhalnin E.V., et al. The processing of seeds of spring wheat by low-frequency electromagnetic field in an industrial environmental. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019. Vol. 7. N6. 1057-1061. EDN: VQZECG.
 15. Старухин Р.С., Белицын И.В., Хомутов О.И. Метод предпосевной обработки семян с использованием эллиптического электромагнитного поля // *Ползуновский вестник. Раздел 1. Проблемы электробезопасности. Современные электротехнологии и электрооборудование*. 2009. N4. С. 97-98.
 16. Мазитов Н.К., Шогенов Ю.Х., Ценч Ю.С. Сельскохозяйственная техника: решения и перспективы // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. 3(32). С. 94-100. EDN: YLWHAL.
 17. Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С., Бейлис В.М. Создание и развитие систем машин и технологий для комплексной механизации технологических процессов в растениеводстве // *История науки и техники*. 2019. N12. С. 46-55. EDN: RJSVZT.
 18. Измайллов А.Ю. Интеллектуальные технологии и роботизированные средства в сельскохозяйственном производстве // *Вестник Российской академии наук*. 2019. Т. 89. N5. С. 536-538. DOI: 10.31857/S0869-5873895536-538. EDN: UKKACW.
 19. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. N4. С. 6-10. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10. EDN: YFRZDV.
 20. Бейлис В.М., Ценч Ю.С., Коротченя В.М. и др. Тенденции развития прогрессивных машинных технологий и техники в сельскохозяйственном производстве // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N4 (33). С. 150-156. EDN: YTHPID.

REFERENCES

1. Sorokopudova O.A., Donetskikh V.I., Dolganova Z.V. Stimulyatsiya vskhozhesti semyan *Iris EnsataThunb*. Magnitnymi impul'sami s izmenyaemoy chastotoy [Stimulation of seed germination of *Iris EnsataThunb*. magnetic pulses with variable frequency]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Khimiya. Biologiya. Farmaciya*. 2016. N2. 98-101 (In Russian).
2. Grigorieva E., Shulga P. Agricultural development in the Canadian Prairies. *International agricultural journal*. 2022. N5. 441-449 (In English). DOI: 10.55186/25876740_2022_6_5_28.
3. Sharshunov V.A., Chervyakov A.V., Kurzenkov S.V., Tsirkunov A.S. Oborudovanie dlya predposevnogo stimulirovaniya semyan SVCh-polem [The equipment for pre-sowing stimulation of seeds microwave field]. *Konstruirovaniye, ispol'zovaniye i nadezhnost' mashin sel'skokozyaystvennogo naznacheniya*. 2011. N1(10). 5-10 (In Russian). EDN: VBFGBZ.
4. Alchimbayeva A.S., Shibryaeva L.S., Zhalnin E.V., et al. The processing of seeds of spring wheat by low frequency elec-

- tromagnetic field in an industrial environment. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019. Vol. 7. Is. 6. (In English). EDN: VQZECG.
5. Pushkina N.V. Vliyaniye predposevnoy obrabotki semyan elektromagnitnym polem sverkhvysokochastotnogo diapazona na strukturno-funkcional'noe sostoyaniye prorostkov kukuruzy [Influence of pre-sowing seeds treatment by the electromagnetic field superhigh-frequency range on the structurally-frequency range on and functional condition corn rootlets]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2016. N4(46).Part 5. 32-34 (In Russian). DOI: 10.18454/IRJ.2016.46.265.
 6. Antipkina L.A., Levin V.I., Borychev S.N., et al. Ispol'zovanie gradientnogo magnitnogo polya v predposevnoy obrabotke semyan ogurtsa [Use of a gradient magnetic field in the pre-sowing treatment of cucumber seeds]. *Agroecoinfo*. 2022. N1 (In Russian). DOI: 10.51419/202121123. EDN: ERAYMM.
 7. Karimtayeva T., Orazbay A., Ishmuratova M.Yu. Otsenka biomassy prorostkov zernovykh kul'tur posle obrabotki lazerom [Assesment of the biomass of grain seedlings after laser treatment]. *Aktual'nye problemy sovremennosti*. 2020. 4(30). 162-167 (In Russian). EDN: NOHABV.
 8. Shogenov Yu.Kh., Romanovsky Yu.M., Izmailov A.Yu., et al. Reaktsii rasteniy na lokal'noe elektromagnitnoe izlucheniye v shirokom diapazone dlin voln [Reactions of plants to local electromagnetic radiation in a wide wave length range]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2018. N2. 27-30 (In Russian). EDN: YTUYPY.
 9. Kozyrskiy V.V., Savchenko V.V., Sinyavskiy A.Yu. Predposevnaya obrabotka semyan zernobovovykh kul'tur v magnitnom pole [Pre-sowing treatment of leguminous crop seeds with a magnetic field]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. N1. 21-26 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-13-1-21-26. EDN: YWZJNR.
 10. Kutyrev A.I., Khort D.O., Filippov R.A., Tsench Yu.S. Magnitno-impul'sivnaya obrabotka semyan zemlyaniki sadovoy [Magnetic-pulse treatment of garden strawberry seeds]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2017. N5. 9-15 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-11-5-9-15. EDN: ZSLLGN.
 11. Akhmetshin A.T., Atnagulov D.T., Mukhamed'yanova T.K. Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya obrabotki semyan pshenitsy magnitnym polem na ikh vodopogloshcheniye [Studying experimentally the effect of treatment wheat seeds with a magnetic field on their water absorption]. *APK Rossii*. 2020. N2. 245-249 (In Russian). EDN: WENYOA.
 12. Kuleshov A.N., Ereshko A.S., Khronyuk V.B. Primeneniye magnitnykh poley postoyannykh magnitov dlya predposevnoy obrabotki semyan yachmenya [The application of the magnetic fields of the permanent magnet for the barley seeds pre-sowing]. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*. 2011. N1(13). 95-100 (In Russian). EDN: RDPTTL.
 13. Levina N.S., Tertysnaya Yu.V., Bidey I.A., et al. Posevnye kachestva semyan myagkoy yarovoy pshenitsy (*Triticum aestivum* L.) pri raznykh rezhimakh vozdeystviya nizkochastotnym elektromagnitnym polem [Pre-sowing treatment of seeds of spring wheat with low-frequency electromagnetic field]. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya*. 2017. Vol. 52. N3. 580-587 (In Russian). DOI: 10.15389/agrobiology.2017.3.580rus.
 14. Alchimbayeva A.S., Shibryaeva L.S., Zhalnina E.V., et al. The processing of seeds of spring wheat by low frequency electromagnetic field in an industrial environment. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019. Vol. 7. N6. 1057-1061 (In English). EDN: VQZECG.
 15. Starukhin R.S., Beliysyn I.V., Khomutov O.I. Metod predposevnoy obrabotki semyan s ispol'zovaniem ellipticheskogo elektromagnitnogo polya [Method of pre-sowing seed treatment using an elliptical electromagnetic field]. *Polzunovskiy vestnik. Problemy elektrobezopasnosti. Sovremennyye elektrotekhnologii i elektrooborudovanie*. 2009. N4. 97-98 (In Russian).
 16. Mazitov N.K., Shogenov Yu.Kh., Tsench Yu.S. Sel'skokhozyaystvennaya tekhnika: resheniya i perspektivy [Agricultural machinery: solutions and prospects]. *Vestnik VIESH*. 2018. N3(32). 94-100 (In Russian). EDN: YLWHAL.
 17. Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S., Beylis V.M. Sozdaniye i razvitiye sistem mashin i tekhnologii dlya kompleksnoy mekhanizatsii tekhnologicheskikh protsessov v rasteniyevodstve [Creation and development of systems for machines and technologies for the complex mechanization of technological processes in crop production]. *Istoriya nauki i tekhniki*. 2019. N12. 46-55 (In Russian). EDN: RJSVZT.
 18. Izmailov A.Yu. Intellektual'nye tekhnologii i robotizirovannyye sredstva v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve [Intelligent technologies and robotic means in agricultural production]. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*. 2019. Vol. 89. N5. 536-538 (In Russian). DOI: 10.31857/S0869-5873895536-538. EDN: UKKACW.
 19. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Tsifrovyye tekhnologii i robotizirovannyye tekhnicheskiye sredstva dlya sel'skogo khozyaystva [Digital technologies and robotic devices in the agriculture]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol. 15. N4. 6-10 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10. EDN: YFRZDV.
 20. Beylis V.M., Tsench Yu.S., Korotchenya V.M., et al. Tendentsii razvitiya progressivnykh mashinnykh tekhnologii i tekhniki v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve [Trends in the development of advanced machine technologies and techniques in agricultural production]. *Vestnik VIESH*. 2018. N4 (33). 150-156 (In Russian). EDN: YTHPID.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Дорохов А.С. – научное руководство, постановка проблемы, разработка теоретических предпосылок, формулирование основной концепции, целей и задач исследования, доработка текста, формирование общих выводов;

Чаплыгин М.Е. – формулирование основных целей и задач исследования, доработка текста и оформление материалов, анализ литературных источников, формирование общих выводов, итоговая переработка статьи;

Аксенов А.Г. – формулирование основной концепции исследования, формирование общих выводов, анализ литературных источников;

Шибряева Л.С. – разработка теоретических предпосылок, формулирование основных целей и задач исследования, доработка текста и оформление материалов, анализ литературных источников, выбор и обоснование режимов облучения, формирование выводов по результатам исследований и общих выводов;

Блинов Н.Д. – апробация разрабатываемых режимов, облучения семян, анализ состава зерна;

Чулков А.С. – доработка текста и оформление материалов, разработка и обоснование конструкции установки;

Подзоров А.В. – разработка и обоснование конструкции установки, обоснование параметров пробоотборников, анализ литературных источников.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Dorokhov A.S. – scientific supervision, problem statement, development of theoretical prerequisites, formulation of the basic concept of the study, its goals and objectives, manuscript revision, formation of general conclusions;

Chaplygin M.E. – formulation of the study main goals and objectives, manuscript revision and material design, literary review, formation of general conclusions, manuscript final revision;

Aksenov A.G. – formulation of the research main concept, formation of general conclusions, literature review;

Shibryaeva L.S. – development of theoretical prerequisites, formulation of the study main objectives and objectives, manuscript revision and preparation of materials, analysis of literary sources, selection and justification of exposure modes, formation of conclusions based on the study results and general conclusions;

Blinov N.D. – testing the developed modes, performing seed irradiation, performing grain composition analysis;

Chulkov A.S. – manuscript finalization and material design, development and justification of the plant design;

Podzorov A.V. – development and justification of the plant, justification of the parameters for the samplers, literature review.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
The paper was accepted for publication on

03.10.2023
20.11.2023