

**ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ /
ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.595-617>EDN: <https://elibrary.ru/tdzhex>

УДК / UDK 621.372.873.3:581.192.7:633.521

*Оригинальная статья / Original article***Повышение посевных качеств семян
льна-долгунца при обработке в магнитном
градиентном поле постоянного тока****И. В. Юдаев¹✉, А. А. Акимов², С. С. Скворцов²,
Н. Н. Иванютина², А. И. Беленков³, И. О. Плотницкий⁴**¹*Кубанский государственный аграрный университет
имени И. Т. Трубилина,**г. Краснодар, Российская Федерация, <https://ror.org/058jafb94>*²*Тверская государственная сельскохозяйственная академия,
г. Тверь, Российская Федерация, <https://ror.org/021lwq19>*³*Федеральный научный центр кормопроизводства
и агроэкологии имени В. Р. Вильямса,**г. Лобня, Российская Федерация*⁴*ООО Объединение инноваций,
г. Москва, Российская Федерация*✉ etsh1965@mail.ru*Аннотация*

Введение. Стратегической целью ведения эффективного землепользования при возделывании технических культур является необходимость повышения их урожайности с сохранением качества получаемого сырья, что возможно реализовать, начав с подготовки качественного семенного материала.

Цель исследования. Экспериментально оценить влияние предпосевной обработки семян льна-долгунца магнитным градиентным полем постоянного тока на их рост, развитие и продуктивность.

Материалы и методы. В качестве объекта выбраны семена льна-долгунца. Для изменения параметров режимов градиентной магнитной предпосевной обработки использована специализированная лабораторная установка, позволяющая изменять параметры градиентного магнитного поля в следующем диапазоне: индукция магнитного поля внутри рабочей камеры – от 0,83 до 8,00 мТл, сила тока в обмотках – от 0,2 до 2,0 А, напряжение питания – от 2,5 до 25 В. Обработка семян и исследования на всхожесть и энергию прорастания осуществлялись в лабораторных условиях. Полевые опыты проводились на опытном участке, почва которого имела следующие характеристики: дерново-среднеподзолистая легкосуглинистая остаточной карбонатной глееватая

© Юдаев И.В., Акимов А.А., Скворцов С.С., Иванютина Н.Н., Беленков А.И., Плотницкий И.О., 2026

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

на морене, характеризуется гумусом – 1,6 %; подвижным фосфором P_2O_5 – 345 мг/кг; обменным калием K_2O – 85 мг/кг; pH_{KCl} – 5,03; мощностью пахотного слоя – 20–22 см. **Результаты исследования.** Энергия прорастания обработанных семян увеличилась в среднем на 11,4 %, а лабораторная всхожесть – на 14,8 %. Подтвердилась положительная реакция семян на обработку – общая выживаемость растений льна-долгунца на отдельных вариантах увеличилась с 22,9 (контроль) до 35,6 %. Зафиксировано увеличение урожайности льнотресты с 25,6 (контроль) до 51,8 ц/га и льносемян – с 6,6 (контроль) до 12,6 ц/га. Поскольку лен-долгунец возделывался на семенные цели, был определен коэффициент размножения. На отдельных вариантах он равнялся 32, 33 и 37 ед., по сравнению с 17 ед. на контроле.

Заключение. Наилучшая отзывчивость семян льна (всхожесть, энергия роста, выживаемость и др.) зафиксирована при их обработке в магнитном поле с индукцией 5,81; 6,70 и 7,35 мТл. Такие параметры магнитопрайминга позволяют технически просто и экономически выгодно организовать обработку семян и их пятидневную отлежку в местах непосредственного складского хранения с последующим высевом в почву. Дальнейшие исследования могут быть направлены на проведение многолетних наблюдений, что позволит подготовить рекомендации по применению этого агротехнического приема для внедрения в организации и хозяйства, которые занимаются семеноводством и интенсивным выращиванием льна-долгунца.

Ключевые слова: предпосевная стимуляция семян, градиентное магнитное поле, семена льна-долгунца, параметры и режимы обработки, индукция магнитного поля, всхожесть семян, энергия роста, структура урожая

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Юдаев И.В., Акимов А.А., Скворцов С.С., Иванютина Н.Н., Беленков А.И., Плотницкий И.О. Повышение посевных качеств семян льна-долгунца при обработке в магнитном градиентном поле постоянного тока. *Инженерные технологии и системы.* 2026;36(3):595–617. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.595-617>

Improving the Sowing Qualities of Fibre Flax Seeds Treated in a Direct Current Magnetic Gradient Field

I. V. Yudaev^a✉, A. A. Akimov^b, S. S. Skvortsov^b,
N. N. Ivanyutina^b, A. I. Belenkov^c, I. O. Plotnitsky^d

^aI. T. Trubilin Kuban State Agricultural University,
Krasnodar, Russian Federation, <https://ror.org/058jafb94>

^bTver State Agricultural Academy,
Tver, Russian Federation, <https://ror.org/0211wgq19>

^cFederal Williams Research Center of Forage Production
and Agroecology,

Lobnya, Russian Federation

^dООО «Association of Innovations»,

Moscow, Russian Federation

✉ etsh1965@mail.ru

Abstract

Introduction. The strategic objective of efficient land management in cultivating industrial crops is the increase of their yield while maintaining the quality of the raw materials obtained that can be achieved if prepare high-quality seed material.

Aim of the Study. The study is aimed at determining experimentally the effect of pre-sowing treatment of fibre flax seeds in a direct current magnetic gradient field on their growth, development and productivity.

Materials and Methods. The study object was fibre flax seeds. To vary the parameters of the gradient magnetic pre-sowing treatment modes, there was used a specialized laboratory setup, which allows adjusting the gradient magnetic field parameters within the following ranges: magnetic field induction inside the working chamber – from 0.83 to 8.00 mT, current in the windings – from 0.2 to 2.0 A, and supply voltage – from 2.5 to 25 V. Seed treatment and studies germination ability and germination energy were carried out under laboratory conditions. The field experiments were conducted on an experimental plot, the soil of which was soddy-medium-podzolic light loamy residual carbonate gleyic on moraine with content – 1.6%; labile phosphorus P_2O_5 – 345 mg/kg, exchangeable potassium K_2O – 85 mg/kg; pH_{KCl} – 5.03; thickness of the arable layer – 20–22 cm.

Results. The germination energy of the treated seeds increased on average by 11.4%, and laboratory germination – by 14.8%. The results of field studies confirmed the positive response of seeds to the treatment – the overall survival of fibre flax plants in certain variants increased from 22.9% (control) to 35.6%. There has been recorded that the fibre flax straw yield increased from 25.6 (control) to 51.8 c/ha, and flax seed yield – from 6.6 (control) to 12.6 c/ha. Since fibre flax was cultivated for seeds, there has been determined the multiplication coefficient. In certain variants, it was 32, 33 and 37 units, compared to 17 units in the control.

Conclusion. The best response of flax seeds (germination, growth energy, etc.) was recorded after treating in a magnetic field with an induction of 5.81, 6.70 and 7.35 mT. These magnetopriming parameters make possible a technically simple and cost-effective treatment of seeds and their five-day warehouse storage followed by sowing into the soil. Further research may be aimed at conducting long-term observations that will allow preparing recommendations for using this agricultural method at agricultural organizations and farms involved in seed production and intensive cultivation of fiber flax.

Keywords: pre-sowing stimulation of seeds, gradient magnetic field, fiber flax seeds, treatment parameters and modes, magnetic field induction, seed germination, growth energy, yield structure

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Yudaev I.V., Akimov A.A., Skvortsov S.S., Ivanyutina N.N., Belenkov A.I., Plotnitsky I.O. Improving the Sowing Qualities of Fibre Flax Seeds Treated in a Direct Current Magnetic Gradient Field. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(3):595–617. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.595-617>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время Российская Федерация обладает существенным потенциалом для производства нишевых культур, среди которых выделяется важная для народного хозяйства техническая культура – лен-долгунец, волокно из которого имеет наиболее высокую прочность по сравнению с хлопковым.

Посевные площади в России несколько утратили свои показатели не только по сравнению с 1990 годом, но и с 1913 и 1938 годами. Так, в 1913 году площадь посевов составляла 1 020 тыс. га, в 1938 – 2 500 тыс. га, в 1990 – 418 тыс. га, в 2000 – 108 тыс. га, а в 2015 и 2020 – только 53 тыс. га. Российские производители льна также отмечают, что в настоящее время не удастся собрать планируемый урожай из семян отечественной селекции, в то время как семена льна французской

и бельгийской селекции оказываются более продуктивными. Поэтому восстановление производства льна в Российской Федерации является актуальной задачей для аграрного сектора отдельных регионов страны [1].

Технология возделывания льна характеризуется низкой негативной экологической и антропогенной нагрузкой на окружающее пространство: агротехника предполагает применение незначительного количества удобрений и пестицидов, а получаемая продукция почти полностью перерабатывается, оставляя минимум отходов [2].

При подготовке семян льна к посеву важным этапом является их протравливание и инкрустирование. С учетом экологических требований рекомендуется применять протравители – «Витавакс», «Фенорам», ТМТД и биопрепараты «Агат 25» и «Экост 1ГФ». Всероссийский научно-исследовательский институт льна рекомендует проводить инкрустирования совместно с применением микроудобрений – борной кислоты, молибденовокислого аммония, сернокислого цинка [3].

В сельском хозяйстве предпринимаются попытки поиска эффективных, малоэнергоёмких и экологически чистых технологий [4], которые могут повысить всхожесть, увеличить энергию прорастания и урожайность за счет обработки семян физическими воздействиями, в первую очередь, электромагнитной природы: электрическим полем [5]; низкочастотным электромагнитным полем [6]; импульсным электрическим полем [7].

Цель исследования заключается в определении эффективности магнитного градиентного поля постоянного тока, как агротехнологического приема для предпосевной обработки семян льна-долгунца. Для достижения поставленной цели необходимо: изучить влияние режимов обработки в магнитном градиентном поле постоянного тока и параметров этого поля на всхожесть и энергию роста семян льна-долгунца в лабораторных условиях; исследовать рост и развитие растений льна-долгунца, полученных из семян, обработанных в магнитном поле, в течение всего периода их онтогенеза.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В условиях своего естественного произрастания растения подвергаются постоянному магнитному воздействию из-за наличия у планеты собственного геомагнитного поля. Его интенсивность колеблется от значения менее 30 мкТл на большей части территорий Южной Америки и Африки до значения почти 70 мкТл на территориях около магнитных полюсов, на севере Канады и юге Австралии, а также частично на территории Сибири [8]. Коллектив авторов из Нижнего Новгорода совместно с исследователем из Израиля предполагают, что магнитное поле может воздействовать на эффективность подстройки физиологических процессов растений, а также на их адаптацию к стрессовым и изменяющимся условиям. В результате может проявляться «защитный» эффект – «повышение выживаемости растений в стрессовых условиях при изменении интенсивности магнитных полей» [9].

Анализ результатов экспериментальных исследований с аргументированным обоснованием влияния магнитного поля на развитие растений предполагал проявление ауксин-подобного эффекта (магнитотропизма) от воздействия магнитного

поля на прорастающие семена [10]. Интенсивно и разносторонне изучается влияние искусственно созданного магнитного поля на растительные объекты. Его воздействие проявляется в виде стимулирующего эффекта, определяемого в виде различных физиологических реакций со стороны растений и их семян, к которым, в первую очередь, относят: прорастание семян, время цветения, фотосинтез, изменение биомассы, активацию криптохрома, рост и развитие побегов.

Отчеты по проведенным исследованиям свидетельствуют о том, что растения демонстрируют опережающий рост и развитие в ответ на воздействие внешних магнитных полей [11; 12]. Семена сладкого перца (*Capsicum Annuum L.*), подвергнутые воздействию магнитного поля интенсивностью 57–60 мТл, показали повышенную скорость прорастания и увеличенный процент нормально проросших семян с более интенсивным и ускоренным темпом роста, а также улучшением качества плодов, которые характеризовались высоким содержанием фосфора и витамина С [11]. Полевые исследования на основе кратковременной предварительной обработки семян магнитным полем интенсивностью 5–15 мТл и длительностью 5–15 минут показали увеличение всхожести, роста и урожайности растений пшеницы (*Triticum Aestivum L.*) [12].

В то же время проростки ячменя (*Hordeum Vulgare L.*), выращенные в магнитном поле с интенсивностью 10 мТл, характеризовались снижением сырой массы побегов на 12 % и корней на 35 %, а также сухой массы побегов на 19 % и корней на 48 % по сравнению с контрольными образцами, выращенными в условиях их естественного произрастания. По результатам был сделан вывод, что магнитное поле с очень низкой интенсивностью способно задерживать как формирование, так и развитие органов растения¹.

Улучшение параметров прорастания семян, роста и развития растений исследователи объясняют повышенным поглощением питательных веществ. Наблюдалось, что применение магнитного поля влияет непосредственно на мембраны семян, приводя последние к повышению их проницаемости с уменьшением утечки заряженных ионов во время набухания [13]. Также было обнаружено, что липидный компонент клеточной мембраны значительно усиливается в семенах томата (*Solanum Lycopersicum L.*) после применения внешнего магнитного поля интенсивностью 126 и 208 мТл. Это повышает проницаемость мембраны [14] и, в конечном итоге, приводит к перемещению питательных веществ внутрь клеток через каналы мембран. Таким образом, взаимодействие искусственно созданного магнитного поля с мембранной системой растительного объекта может быть ключевым фактором в контроле физиологических реакций растений.

Учеными из Греции была проведена серия экспериментов по обработке в статическом магнитном поле семян овощных культур: томата (*Solanum Lycopersicum L.*), салата (*Lactuca L.*) и руколы (*Eruca SATIVA L.*) [15]. Рассада томата лучше развивалась из семян, обработанных в магнитном поле с индукцией 45 мТл и временем воздействия 60 и 90 мин по сравнению с контролем. Для улучшения роста рассады руколы магнитная индукция должна составлять 150 мТл. Результаты для семян

¹ Лебедев С.И., Баранский П.И., Литвиненко Л.Г., Шиян Л.Т. Рост ячменя в сверхслабом магнитном поле. *Электронная обработка материалов*. 1977;(3):71–73.

салата были противоречивыми, т. е. было неясно, следует ли применять более низкую (45 мТл) или более высокую (300 мТл) индукцию магнитного поля [15].

Изучалась возможность применения обработки в статическом магнитном поле семян льна (*Linum Usitatissimum L.*). Многофакторный эксперимент позволил определить энергию прорастания и всхожесть семян при различных энергетических дозах обработки на установке с постоянными магнитами. Было доказано, что оптимальными параметрами режима предпосевной обработки семян льна в магнитном поле являются: четырехкратное перемагничивание; магнитная индукция – 65 мТл; полюсное деление – 0,23 м; скорость перемещения семян – 0,4 м/с; доза энергии – 1,79 Дж·с/кг. При такой обработке энергия прорастания растений увеличилась на 30 %, всхожесть – на 2,6 %, длина стебля – на 10,5 %, урожайность соломы и семян – на 0,7 и 7,9 ц/га соответственно [16].

Положительное воздействие магнитного поля проявляется в увеличении: всхожести семян; длины корней и побегов; поглощении воды и CO₂; содержания фотосинтетических пигментов. Это способствует устойчивому ведению сельскохозяйственного производства даже в условиях абиотических стрессов [17–19]. Однако в отдельных случаях магнитное поле вызывало угнетение роста растений, и вышеупомянутые параметры ухудшились [20; 21].

Механизм, с помощью которого растения воспринимают магнитное поле и реагируют на его проявление, не изучен полностью [22]. Поэтому для повышения всхожести семян, увеличения урожайности и улучшения развития культуры дополнительно необходимо выявить правильное сочетание интенсивности и времени воздействия магнитного поля. Отдельного изучения требует вопрос влияния градиентного магнитного поля на предпосевную обработку семян, а также оценка ответной реакции, проявляющейся в виде изменения роста и развития растений, формирования урожая.

Градиентное магнитное поле – это, прежде всего, частный случай неоднородного магнитного поля, в котором магнитная индукция поля, его направление или то и другое одновременно изменяются в пространстве. Такое поле можно зафиксировать, например, вблизи постоянных магнитов, катушек индуктивности или в устройствах, использующих магнитные поля для управления движением частиц и др. Основной характеристикой создаваемого градиентного магнитного поля является его градиент – вектор, который показывает, как быстро и в каком направлении изменяется магнитная индукция.

Проведенные в России исследования по изучению влияния градиентного магнитного поля касались в основном обработки семян овощных, злаковых, масличных и других культур [23]. Так, экспериментальным путем был подтвержден положительный эффект обработки семян огурца (*Cucumis sativus L.*). Устойчивая стабильность магнитобиологических эффектов у проростков огурца была зафиксирована при скорости движения семян 1–2 м/с в магнитном поле, напряженность которого была в диапазоне значений 3 979–11 937 А/м. Сформировавшиеся растения в сравнении с контрольными образцами имели более высокую продуктивность процесса фотосинтеза и обладали большим числом женских цветков. Следовательно, урожайность в опытных вариантах увеличилась (на 7,6–15,3 %) [23].

Анализ проведенных исследований позволил сформировать общие закономерности положительного влияния магнитного поля на развитие семян сельскохозяйственных культур. К основным эффектам, способствующим повышению урожайности, относятся: увеличение всхожести; повышение устойчивости к стрессовым факторам (засуха, болезни); ускорение роста и развития растений, а также экологическая безопасность метода, так как рассматриваемый подход является экологически чистой технологией и служит альтернативой химическим обработкам.

На наш взгляд, градиентное магнитное поле эффективнее однородного вследствие того, что оно вносит пространственную неоднородность, которая превращает электромагнитное воздействие из окружающего растительного «фона» в активный фактор, способный:

- физически перемещать заряженные и нейтральные элементарные частицы – основу построения внутренней структуры семени за счет сил пропорциональных градиенту поля;
- инициировать квантовые переходы в спиновых системах, составляющих внутриклеточные основы построения растительных организмов, что особенно проявляется в структурированной воде, и запускать биохимические процессы;
- обеспечивать более полное и равномерное «пробуждение» метаболизма семени, что подтверждается ростом числа корешков, увеличением биомассы и повышенной урожайностью.

В качестве рабочей гипотезы можно предположить следующее: семя содержит сложные органические молекулы и воду, которая является диамагнетиком. Она слабо намагничивается в направлении, противоположном внешнему магнитному полю, из-за отсутствия неспаренных электронов. Это значит, что вода отталкивается магнитным полем, хотя этот эффект очень слаб и незаметен в обычных условиях. В градиентном поле на молекулы воды, входящие в состав семени, действует сила, «выталкивающая» их в сторону меньшей интенсивности магнитного поля. Это создает локальные градиенты давления и концентрации внутри клеток семени, что может служить триггером для активизации метаболизма.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

Для изучения процесса предпосевной обработки в магнитном градиентном поле постоянного тока с целью стимуляции посевных качеств, роста, развития и продуктивности растений были выбраны семена льна-долгунца (*Linum usitatissimum* L.) сорта «Атлант», включенного в Госреестр по Северо-Западному региону.

Лен-долгунец сорта «Атлант» рекомендован для возделывания в Вологодской и Тверской областях. Стебель длинный. Точечность чашелистиков отсутствует или очень слабая. Венчик при полном развитии синий. Коробочка маленькая, бахромчатость ложной перегородки отсутствует. Семя темно-коричневое. Время начала цветения раннее. Вегетационный период составляет 87 дней. Высота растений – 79 см. Масса 1 000 семян – 4,9 г. Устойчивость к полеганию – 4,6 балла, а к осыпанию – 5,0 балла. Содержание волокна – 31,1 %, выход длинного волокна – 22,4 %,

относительная разрывная расчетная нагрузка (прочность) – 140,3 мН/текс. Сорт устойчив к фузариозному увяданию и ржавчине, а также к фузариозу. Средняя урожайность льносоломы составляет 46,5 ц/га, что на 0,9 ц/га выше стандарта. Урожайность семян на уровне стандарта – 4,6 ц/га.

Для посева использовались семена категории ОС (Маточная элита 2 года), обработанные согласно схеме опыта.

Методы исследования

Методология исследования включала комплекс лабораторных, полевых, инструментальных и статистических подходов. Исследования проводили в 2024 году в условиях лаборатории кафедры агрохимии, земледелия и лесопользования Тверской государственной сельскохозяйственной академии. Лабораторную всхожесть семян и их энергию прорастания определяли согласно ГОСТ 12038-84².

Полевой опыт закладывали на опытном участке Тверской государственной сельскохозяйственной академии на дерново-среднеподзолистой легкосуглинистой остаточной карбонатной глееватой на морене почве. Агрохимические показатели пахотного слоя почвы до закладки опыта были следующие: гумус (по Тюрину) – 1,6 %; подвижный фосфор P_2O_5 – 345 мг/кг, обменный калий K_2O – 85 мг/кг (по Кирсанову); pH_{KCl} – 5,03; мощность пахотного слоя – 20–22 см. Повторность опыта была четырехкратной, размещение вариантов – рендомизированным, площадь опытной делянки составляла 18 м².

Агротехника возделывания льна-долгунца соответствовала общепринятой для Тверской области, включая дискование, вспашку, культивацию, внесение минеральных удобрений (азофоска 3 ц/га), узкорядный посев с нормой высева 12 млн всхожих семян на 1 га, прикатывание, обработку гербицидами и сплошную уборку урожая. Инструментальные измерения включали определение параметров установки для магнитной обработки: общего сопротивления и индуктивности катушек (11,5 Ом и 0,059 Гн соответственно), силы тока (0,2–2,0 А), напряжения питания (2,5–25 В) и индукции магнитного поля внутри рабочей камеры (0,83–8,00 мТл), которую измеряли цифровым гауссметром GOYOJO GT129A.

Для создания градиентного магнитного поля использовалась специализированная установка с вертикальной цилиндрической камерой, основными и дополнительными согласно-встречно включенными обмотками, формирующими линейный аксиальный градиент.

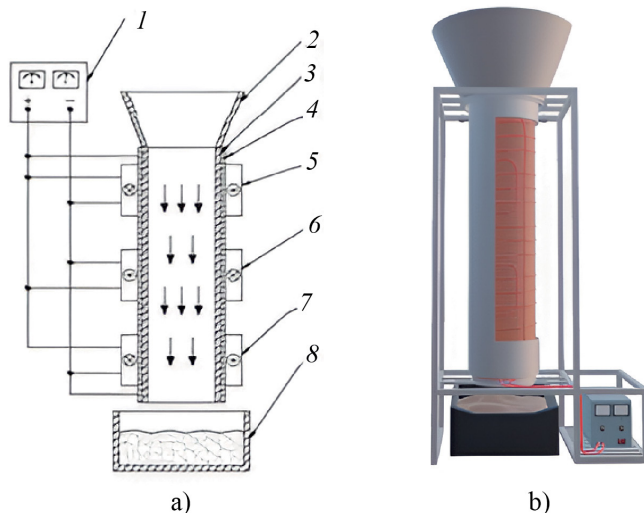
В ходе полевых экспериментов проводили морфометрические измерения: определяли высоту растений, техническую длину и толщину стебля, количество растений перед уборкой, число коробочек на одном растении, число семян в одной коробочке, массу семян с одной коробочки и массу 1 000 семян. Урожайность льнотресты и льносемян учитывали в ц/га с пересчетом на стандартную влажность. Качество волокна оценивали по содержанию волокна и его урожайности. Агрохимический анализ почвы включал определение содержания гумуса, подвижного фосфора и обменного калия, кислотности. Статистическую обработку экспериментальных данных проводили методом дисперсионного анализа с оценкой

² ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023365> (дата обращения: 14.08.2025).

наименьшей существенной разности (HCP_{05}) для подтверждения достоверности полученных результатов. Дополнительно рассчитывали коэффициент размножения как отношение полученного урожая семян к массе высеванных семян. Визуализация результатов исследований осуществлялась с использованием программ Microsoft Excel, nanoCAD и ZBrush.

Оборудование и процедура исследования

Семена льна-долгунца перед высевом предварительно подвергали обработке градиентным магнитным полем постоянного тока на специализированной установке (рис. 1)³.



Р и с. 1. Установка для предпосевной обработки семян льна в градиентном магнитном поле:

а) условная схема: 1 – источник постоянного тока; 2 – загрузочная воронка; 3 – основание; 4 – основная обмотка; 5 и 7 – согласно включенные дополнительные обмотки; 6 – встречно включенная дополнительная обмотка; 8 – приемный бункер; б) 3D-модель

F i g. 1. Installation for pre-sowing treatment of fiber flax seeds in a gradient magnetic field:
a) schematic diagram: 1 – direct current source; 2 – loading hopper; 3 – base; 4 – main winding; 5 and 7 – series-connected additional windings; 6 – counter-connected additional winding; 8 – receiving hopper; б) 3D model

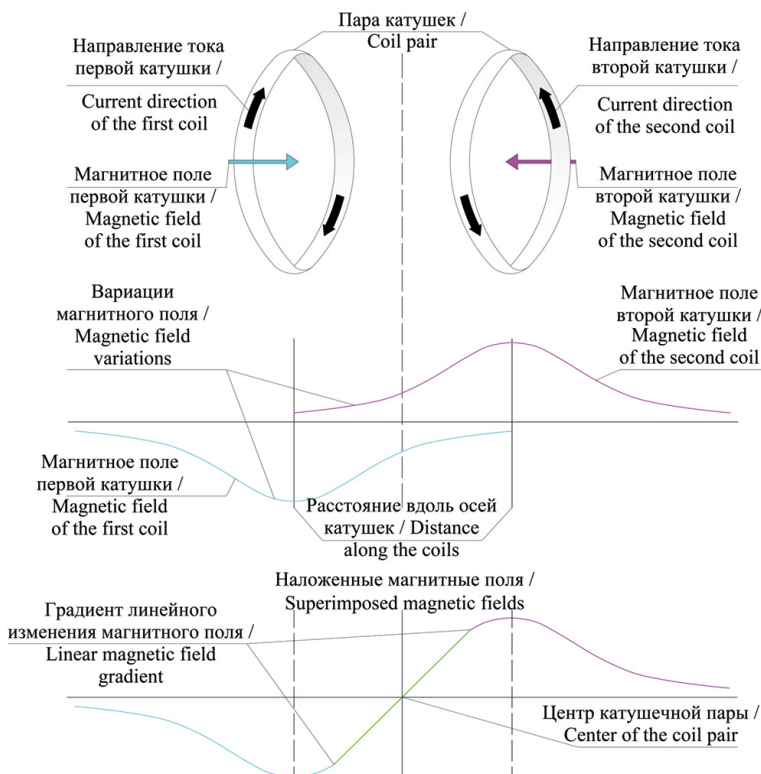
Источник: рисунки 1, 2 составлены авторами статьи в программах «nanoCAD» и «ZBrush».

Source: Figures 1, 2 were compiled by the authors of the article in the program «nanoCAD» and «ZBrush».

Установка для предпосевной обработки (рис. 1) семян льна-долгунца представляет собой конструкцию, состоящую из источника постоянного тока 1 с регулируемыми выходными параметрами – напряжением и током, а также из рабочего органа – рабочей камеры (активатора), в которой осуществляется обработка семян. Конструктивно камера изготовлена в виде вертикальной цилиндрической трубы-колонны с внутренней трубой-основанием из немагнитного материала 3, размещенными на ней обмотками 4–7 и внешнего защитного кожуха-корпуса из немагнитной нержавеющей стали. На внутренней трубе размещена основная

³ Кутис С.Д., Кутис Т.Л. Электромагнитные технологии в растениеводстве. Электромагнитная обработка семян и посадочного материала. М.: РИДЕРО; 2017. 76 с.

обмотка, на поверхности которой закреплены дополнительные обмотки 5–7, разнесенные по высоте рабочего органа, согласованно-встречно соединенные и размещенные в определенной пространственной последовательности. Между собой эти обмотки соединены таким образом, что, несмотря на протекающий по ним постоянный ток, создается меняющееся по длине колонны-трубы градиентное (аксиальное) магнитное поле [24]. Оно создается внутри и снаружи рабочего органа установки при помощи катушек, по которым протекает постоянный ток амплитуды в диапазоне от 0,2 до 2,0 А, но противоположного направления, что приводит к появлению магнитных полей разной полярности. При объединении изменяющихся магнитных полей образуется их линейное изменение между катушками, что формирует линейный градиент магнитного поля, например, как две катушки создают градиент, который является линейным только в середине (рис. 2).



Р и с. 2. Физический принцип формирования линейного градиента магнитного поля

F i g. 2. Physical principle of forming a linear magnetic field gradient

В классической схеме для создания линейного аксиального градиента чаще используют две катушки, однако три катушки также могут быть использованы в более сложной конфигурации, например, центральная катушка включена в одном направлении, а две крайние – в противоположном. Это позволяет увеличить область линейности градиента или получить более высокую эффективность при тех же габаритах.

Внутри вертикальной части (активатора) установки создается основное однородное магнитное поле, но поверх него за счет размещения на цилиндрической основной обмотке специальных градиентных катушек создается неоднородное магнитное поле (рис. 2). Создание градиентного поля в рабочей камере (активаторе) – это результат интерференции полей от нескольких специально спрофилированных и скоммутированных катушек, которые вместе создают суммарное поле, линейно меняющееся в нужном направлении.

Семена загружали в приемную воронку 2 и после свободного, самотечного перемещения они поступали в накопительную выгрузную емкость 8. Напряжение на установку подавалось от промышленно выпускаемого источника постоянного тока с регулируемыми параметрами – током и напряжением.

Сопоставили значения тока и напряжения измеренным значениям индукции магнитного поля, режимы которой для удобства проведения обработки были предварительно отгарированы в значениях амплитуды индукции магнитного поля, измеренной внутри рабочей камеры.

Перед началом исследований были проведены предварительные поверочные испытания установки, в результате которых определили следующие ее параметры и характеристики:

- общее сопротивление и индуктивность катушек равны 11,5 Ом и 0,059 Гн;
- индукция магнитного поля, измеренная внутри установки, составила диапазон значений от 0,83 до 8,0 мТл;
- сила тока для указанных значений индукции варьировалась от 0,2 до 2,0 А;
- напряжение питания, подаваемое на обмотки, изменялось от 2,5 до 25 В;
- характер изменения индукции магнитного поля на поверхности защитного кожуха рабочей камеры (активатора), который представлял собой объединение разнополярных отклонений магнитного поля отдельных пар градиентных катушек (рис. 3). Постоянный ток, протекающий по обмоткам установки, равен 0,6 А; 1,2 А; 1,8 А.

Повышать напряжение выше установленных значений не следует из-за выделения тепла нагреваемых обмоток, что изменяет параметры магнитного воздействия на семена (искажается чистота магнитной обработки), поэтому дополнительно необходимо комплектовать установку системой принудительного охлаждения.

Схема опыта, в соответствии с которым семена льна-долгунца были подвергнуты обработке, представлена в таблице 1.

Обработка почвы в осенний период заключалась в дисковании агрегатом МТЗ-82 с БДТ-3 и последующей вспашкой при появлении массовых всходов сорняков агрегатом МТЗ-82 с ПЛН-3-35. Весеннюю обработку проводили культивацией в два следа агрегатом Т-150 с КБМ-8. Минеральные удобрения вносились под предпосевную обработку, в норме – 3 ц/га азофоски (16:16:16). Предпосевную обработку почвы проводили агрегатом Т-150 с КБМ-8 в один след. Посев льна-долгунца осуществлялся 27 мая 2024 года агрегатом МТЗ-82 с СПУ-3 с нормой высева 12 млн. всхожих семян на 1 га узкорядным способом посева. После посева почву прикатывали агрегатом МТЗ-82 с ККЗ-6.



Р и с. 3. Распределение магнитной индукции на поверхности рабочего органа установки для обработки семян льна-долгунца в градиентном магнитном поле

Fig. 3. Distribution of magnetic induction on the surface of the working element of the installation for treatment of fiber flax seeds in a gradient magnetic field

Источник: рисунки 3–6 составлены авторами статьи в программе Microsoft Excel.

Source: Figures 3–6 were compiled by the authors of the article in the program Microsoft Excel.

Таблица 1

Table 1

Схема опыта обработки семян льна-долгунца в магнитном градиентном поле

Scheme of the experiment on treating fiber flax seeds in a magnetic gradient field

Вариант обработки / Treatment option	Вид обработки / Type of treatment
Контроль / Control	Без обработки в магнитном градиентном поле / Without magnetic gradient field treatment
Обработка в магнитном аксиальном градиентном поле с индукцией внутри рабочего пространства камеры / Treatment in a magnetic axial gradient field with induction in the central part inside the working space of the chamber	
Вариант 1 / Option 1	0,83 мТл
Вариант 2 / Option 2	1,68 мТл
Вариант 3 / Option 3	2,51 мТл
Вариант 4 / Option 4	3,34 мТл
Вариант 5 / Option 5	4,20 мТл
Вариант 6 / Option 6	5,04 мТл
Вариант 7 / Option 7	5,81 мТл
Вариант 8 / Option 8	6,70 мТл
Вариант 9 / Option 9	7,35 мТл
Вариант 10 / Option 10	8,00 мТл

Источник: таблицы 1–4 составлены авторами статьи.

Source: The tables 1–4 were compiled by the authors of the article.

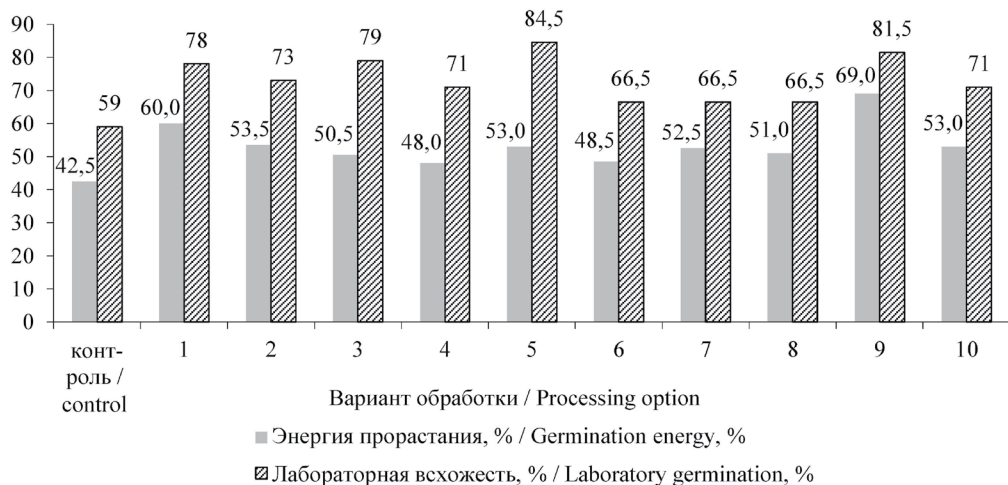
Применение против сорняков баковой смеси гербицидов Агритокс (1 л/га), Хантер (3 л/га), Секатор Турбо (0,1 л/га) проводилось в фазу «елочки» при высоте пырея ползучего 10–15 см опрыскивателем ЖУК вручную с нормой расхода рабочей жидкости 400 л/га. Уборка урожая осуществлялась 14 сентября 2024 года сплошным способом агрегатом МТЗ-82 с ЛК-5А.

Агрометеорологические условия при проведении исследований сильно отличались от средних многолетних значений. Неблагоприятные погодные условия в мае (аномально низкие температуры на фоне засушливых явлений) позволили провести сев только в конце месяца. Недостаточное влагообеспечение на фоне аномально высоких среднесуточных температур в первой декаде июня не позволили получить полноценные всходы культуры. В результате полевая всхожесть льна оказалась весьма низкой. На протяжении вегетации культуры отмечалось как недостаточное увлажнение (конец июня – начало июля), так и переувлажнение почвы в отдельные декады при достаточно высокой среднесуточной температуре воздуха в июне-июле.

Коэффициент размножения для льна-долгунца определяли в зависимости от изучаемых вариантов опыта обработки семян в магнитном градиентном поле как отношение массы собранных семян с единицы площади к массе высеванных семян (с учетом фактической нормы посева и массы 1 000 семян). Данный показатель позволяет оценить эффективность применения предпосевной магнитной обработки для семеноводческих целей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

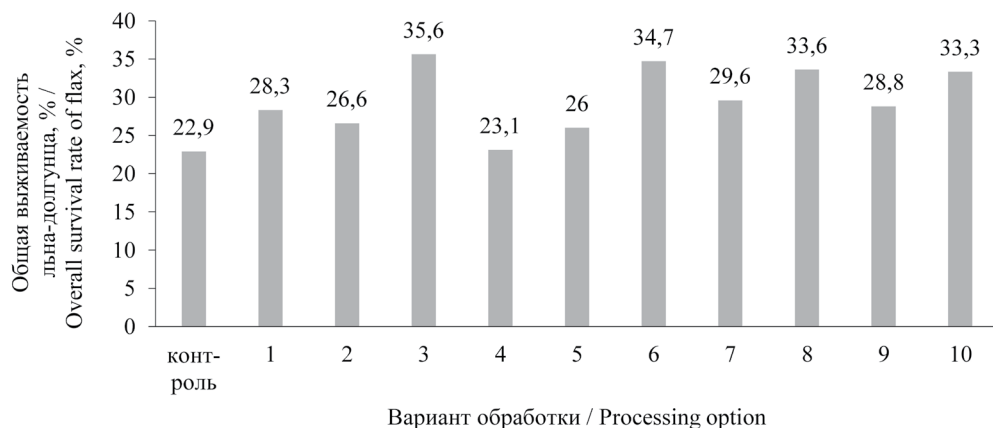
На рисунке 4 представлены гистограммы, характеризующие энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян льна-долгунца в зависимости от вариантов их предпосевной обработки.



Р и с. 4. Влияние предпосевной обработки на энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян льна-долгунца, 2024 год

F i g. 4. Effect of pre-sowing treatment on germination energy and laboratory germination of fiber flax seeds, 2024

На рисунке 5 представлены данные по общей выживаемости растений льна-долгунца в зависимости от изучаемых вариантов предпосевной обработки семян.



Р и с. 5. Влияние предпосевной обработки семян на общую выживаемость льна-долгунца
F i g. 5. Effect of pre-sowing seed treatment on overall survival of flax

Урожайность льна-долгунца (ц/га) в зависимости от приемов предпосевной обработки семян (2024 год) представлена в таблице 2.

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Урожайность льна-долгунца (ц/га) в зависимости
от приемов предпосевной обработки семян, 2024 год
Fiber flax yield (c/ha) depending on pre-sowing seed treatment methods, 2024

Вариант обработки / Processing option	Урожайность, ц/га / Productivity, c/ha		Прибавка / Increase			
			ц/га / c/ha		%	
	тресты / trusts	семян / seeds	тресты / trusts	семян / seeds	тресты / trusts	семян / seeds
Контроль / Control	25,6	6,6	—	—	—	—
Вариант 1 / Option 1	41,2	10,5	15,6	3,9	60,9	59,1
Вариант 2 / Option 2	35,4	8,8	9,8	2,2	38,3	33,3
Вариант 3 / Option 3	45,9	11,0	20,3	4,4	79,3	66,7
Вариант 4 / Option 4	33,2	8,6	7,6	2,0	29,7	30,3
Вариант 5 / Option 5	55,3	12,6	29,7	6,0	116,0	90,9
Вариант 6 / Option 6	58,9	12,4	33,3	5,8	130,1	87,9
Вариант 7 / Option 7	50,0	14,1	24,4	7,5	95,3	113,6
Вариант 8 / Option 8	69,5	15,7	43,9	9,1	171,5	137,9
Вариант 9 / Option 9	66,9	16,6	41,3	10,0	161,3	151,5
Вариант 10 / Option 10	61,3	15,2	35,7	8,6	139,5	130,3
В среднем по вариантам обработки семян / Average by seed treatment options	51,8	12,6	26,2	6,0	102,2	90,2
НСР ₀₅	—	—	1,9	1,1	—	—

В таблице 3 приведена структура урожайности льна-долгунца (2024 год).

Т а б л и ц а 3

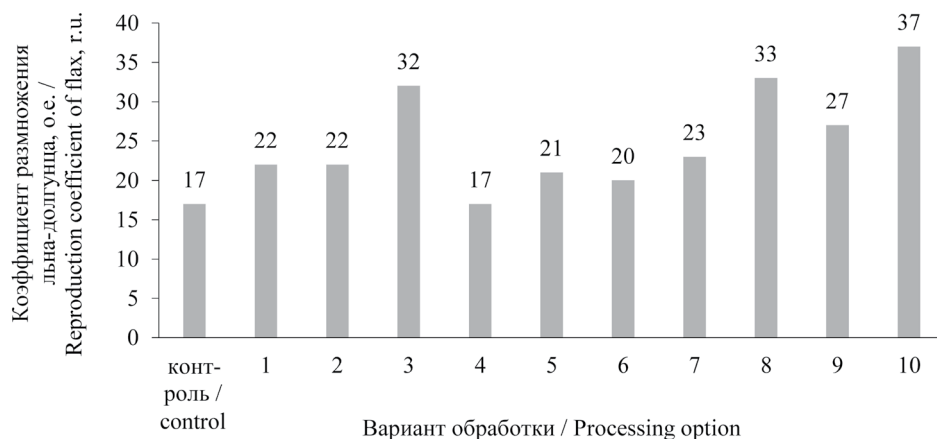
T a b l e 3

Структура урожайности льна-долгунца, 2024 год

Fiber flax yield structure, 2024

Вариант обработки / Treatment option	Количество растений перед уборкой, шт./м ² / Number of plants before harvesting, pcs/m ²	Число коробочек на одном растении, шт. / Number of boxes on one plant, pcs	Число семян в одной коробочке, шт. / Number of seeds in one box, pcs	Масса семян с одной коробочки, г / Weight of seeds per capsule, g	Масса 1 000 семян, г / Weight of 1,000 seeds, g
Контроль / Control	275	10,3	7,14	0,034	4,70
Вариант 1 / Option 1	340	10,6	7,33	0,034	4,77
Вариант 2 / Option 2	319	12,9	6,56	0,031	4,62
Вариант 3 / Option 3	427	12,7	7,11	0,035	4,95
Вариант 4 / Option 4	277	10,4	6,99	0,035	4,79
Вариант 5 / Option 5	312	12,2	6,65	0,030	4,62
Вариант 6 / Option 6	416	8,2	6,94	0,033	4,70
Вариант 7 / Option 7	355	16,5	4,78	0,022	4,42
Вариант 8 / Option 8	403	16,9	5,83	0,029	4,60
Вариант 9 / Option 9	346	15,0	6,16	0,031	5,10
Вариант 10 / Option 10	400	17,4	6,38	0,031	4,76
В среднем по вариантам обработки семян / Average by seed treatment options	360	13,3	6,47	0,031	4,73

На рисунке 6 представлено влияние предпосевной обработки семян на коэффициент размножения льна-долгунца (2024 год).



Р и с. 6. Влияние предпосевной обработки семян на коэффициент размножения льна-долгунца, 2024 год
F i g. 6. Effect of pre-sowing seed treatment on the multiplication factor of flax, 2024

В таблице 4 приведены данные о показателях качества волокна льна-долгунца.

Т а б л и ц а 4

T a b l e 4

Показатели качества волокна льна-долгунца, 2024 год
Fiber flax quality indicators, 2024

Вариант обработки / Treatment option	Высота растения, см / Plant height, cm	Техническая длина стебля, см / Technical length of stem, cm	Толщина стебля, мм / Stem thickness, mm	Содержание волокна, % / Fiber content, %	Урожайность волокна, ц/га / Fiber yield, c/ha
Контроль / Control	85,3	68,2	1,78	18,3	4,7
Вариант 1 / Option 1	98,8	81,7	1,86	18,4	7,6
Вариант 2 / Option 2	89,4	70,8	1,84	19,1	6,8
Вариант 3 / Option 3	104,1	85,4	1,95	14,3	6,6
Вариант 4 / Option 4	100,5	84,6	1,89	17,5	5,8
Вариант 5 / Option 5	102,1	84,1	1,98	16,3	9,0
Вариант 6 / Option 6	102,0	85,5	1,77	18,6	11,0
Вариант 7 / Option 7	106,3	84,4	2,16	19,3	9,7
Вариант 8 / Option 8	108,1	85,4	2,33	15,4	10,7
Вариант 9 / Option 9	105,5	85,6	2,09	16,3	10,9
Вариант 10 / Option 10	97,9	78,0	2,04	16,5	10,1
В среднем по вариантам обработки семян / Average by seed treatment options	101,5	82,6	1,99	17,2	8,8

Экспериментальные данные выявили влияние предпосевной обработки магнитным градиентным полем семян льна-долгунца на показатели роста, развития и продуктивности. Это позволяет перейти к обсуждению механизмов наблюдаемых эффектов и обоснованию оптимальных режимов обработки.

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов лабораторных исследований (рис. 4) показал, что энергия прорастания и всхожесть семян льна-долгунца были минимальными на контрольном варианте – 42,5 и 59,0 %. Применение вариантов обработки семян в магнитном градиентном поле позволило значительно повысить эти показатели с 42,5 до 69 % и с 59 до 84,5 % соответственно. Так, наибольшая энергия прорастания была получена на вариантах 1 и 9 – 60 и 69 %, а лабораторная всхожесть – на вариантах 5 и 9 – 84,5 и 81,5 %.

Таким образом, можно говорить о том, что предпосевная магнитная обработка семян льна-долгунца позволяет увеличить энергию прорастания семян в среднем на 11,4 %, а лабораторную всхожесть – на 14,8 %.

Наблюдение за ростом и развитием растений льна-долгунца показало, что в результате засушливых явлений в начале вегетации на фоне аномально высоких температур полевая всхожесть культуры была невысокой и находилась на уровне 50–55 %. В дальнейшем при нормализации погодных условий рост и развитие культуры можно охарактеризовать как вошедшие в норму. Лен прошел все фенологические фазы развития и закончил вегетацию в середине сентября.

Анализируя гистограммы рисунка 5, можно сделать заключение, что варианты предпосевной обработки семян в магнитном градиентном поле позволили увеличить общую выживаемость льна-долгунца с 22,9 до 35,6 % или, в среднем по вариантам, на 7,1 %. Наибольшая общая выживаемость была отмечена в вариантах 3 и 6 – 35,6 и 34,7 %, т. е. она возросла на 12,7 и 11,8 % соответственно.

Положительное влияние изучаемые варианты предпосевной обработки оказали и на формирование урожайности льна-долгунца (табл. 2). Без применения предпосевной обработки семян урожайность тресты составила 25,6 ц/га, а семян – 6,6 ц/га. Предпосевная магнитная обработка семян достоверно ($НСР_{05} = 1,9$ ц/га и $НСР_{05} = 1,1$ ц/га) увеличила урожайность льнотресты в среднем с 25,6 до 51,8 ц/га, а льносемян – с 6,6 до 12,6 ц/га или на 26,2 и 6,0 ц/га (102,2 и 90,2 %) соответственно. Среди изучаемых вариантов предпосевной обработки семян большую урожайность по обоим показателям обеспечивали варианты 8 и 9.

Разницу в урожайности как тресты, так и семян можно объяснить влиянием изучаемых приемов обработки семян в магнитном градиентном поле на основные элементы структуры урожая льна-долгунца (табл. 3). Количество растений перед уборкой, число коробочек на одном растении и масса 1 000 семян в среднем под воздействием изучаемых вариантов предпосевной обработки в магнитном градиентном поле возросли. При этом существенное влияние оказали изучаемые приемы на количество растений перед уборкой и число коробочек на одном растении, которые увеличились в среднем на 33,3 и 29,1 % соответственно. Действие изучаемых приемов на количество растений перед уборкой было более ярко выражено на 3-м и 6-м вариантах, число коробочек – с 7-го по 10-й вариант, масса 1 000 семян – 3-й и 9-й варианты.

Таким образом, изучение приемов предпосевной обработки семян показало большее их влияние на количество растений перед уборкой и число коробочек на одно растение.

Поскольку лен-долгунец возделывался на семенные цели, то был определен коэффициент размножения для данной культуры в зависимости от изучаемых вариантов опыта обработки семян в магнитном градиентном поле (рис. 6).

Изучаемые приемы предпосевной обработки семян приводят к увеличению коэффициента размножения с 17 до 37. При этом самые большие коэффициенты были получены на 3-м, 8-м и 10-м вариантах обработки (32, 33 и 37 ед.).

Высота растений под влиянием предпосевной обработки семян возрастает с 85,3 до 101,5 см, техническая длина стебля – с 68,2 до 82,6 см, толщина стебля – с 1,78 до 1,99 мм, урожайность волокна – с 4,7 до 8,8 ц/га (табл. 4).

Явного положительного влияния изучаемых вариантов обработки на содержание льноволокна не было выявлено. В то же время некоторое увеличение этого показателя (на 0,8 и 1,0 %) отмечалось на 2-м и 7-м вариантах. При определении урожайности волокна было зафиксировано положительное воздействие изучаемых вариантов обработки семян на его значение. Большая урожайность льноволокна получена на 6-м, 8-м и 9-м (11, 10,7 и 10,9 ц/га) вариантах обработки, что выше, чем на контрольном варианте в 2,34 – 2,28 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной вклад работы заключается в экспериментальном обосновании эффективности применения аксиального градиентного магнитного поля постоянного тока для предпосевной обработки семян льна-долгунца. Впервые показано, что пространственная неоднородность поля с линейным градиентом индукции в диапазоне 0,83–8,0 мТл обеспечивает более выраженный стимулирующий эффект по сравнению с известными аналогами. Это подтверждается увеличением энергии прорастания на 11,4 %, лабораторной всхожести на 14,8 %, а также кратным ростом урожайности до 2,3 раза. Установлены оптимальные режимы обработки 5,81 и 6,70 мТл, при которых достигается максимальный коэффициент размножения семян до 37 единиц против 17 в контроле.

Предложенная технология является экологически безопасной, поскольку исключает применение химических стимуляторов и протравителей для активации метаболизма семян, малозатратной и технологичной, так как реализуется на компактной установке с регулируемыми параметрами. Она обеспечивает стабильный прирост урожайности даже в неблагоприятные по погодным условиям годы, что подтверждает повышение адаптивного потенциала растений после обработки, а также позволяет существенно увеличить выход товарного волокна до 11,0 ц/га и улучшить воспроизводство семенного материала.

Перспективы дальнейших исследований связаны с изучением молекулярно-биологических механизмов воздействия градиентного магнитного поля на мембранные структуры и ферментативные системы семян, включая оценку активности пероксидазы, содержания аденозинтрифосфатов и изменения спектра жирных кислот. Необходимо также оптимизировать конструкцию установки для промышленной реализации, разработать проточные магнитные активаторы с автоматическим контролем режимов и системой охлаждения, провести многофакторные полевые эксперименты в различных почвенно-климатических зонах возделывания льна-долгунца для уточнения зональных рекомендаций по режимам обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рожмина Т.А., Павлова Л.Н., Понажев В.П., Захарова Л.М. Льняная отрасль на пути к возрождению. *Защита и карантин растений*. 2018;(1):3–8. <https://elibrary.ru/ynmxfe>
2. Басова Н.В., Новиков Э.В., Безбабченко А.В. Производство и переработка лубяных культур в России как элемент импортозамещения. *АПК: экономика, управление*. 2022;(8):71–78. <https://doi.org/10.33305/228-71>
3. Акимов А.А., Иванютина Н.Н., Васильев А.С., Дроздов И.А., Фаринюк Ю.Т., Зайцев С.С. Приемы повышения продуктивности сортовых посевов льна-долгунца при выращивании на залежных землях. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2019;(12):206–211. <https://doi.org/10.17513/mjpf.12981>
4. Baev V.I., Yudaev I.V., Petrukhin V.A., Baev I.V., Prokofev P.V., Armanyanov N.K. Electrotechnology as One of the Most Advanced Branches in the Agricultural Production Development. In: *Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development*. Hershey: IGI Global; 2018. pp. 149–175. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-3867-7.ch007>
5. Kazakova A.S., Yudaev I.V., Fedoischenko M.G., Mayboroda S.Yu., Ksenz N.V., Voronin S.M. New Approach to Study Stimulating Effect of the Pre-Sowing Barley Seeds Treatment in the Electromagnetic Field. *OnLine Journal of Biological Sciences*. 2018;18(2):197–207. <https://doi.org/10.3844/ojbsci.2018.197.207>
6. Дорохов А.С., Чаплыгин М.Е., Аксенов А.Г., Шибряева Л.С., Блинов Н.Д., Чулков А.С. и др. Обработка семян зерновых культур в низкочастотном электромагнитном поле. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023;17(4):4–11. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-4-4-11>
7. Хайновский В.И., Копылова О.С., Козырев А.Е. Расчет доз воздействия импульсного электрического поля на семенной материал. *Аграрная Россия*. 2012;(9):37–40. <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2012-9-37-40>
8. Finlay C.C., Maus S., Beggan C.D., Bondar T.N., Chambodut A., Chernova T.A., et al. International Geomagnetic Reference Field: the Eleventh Generation. *Geophysical Journal International*. 2010;183(3):1216–1230. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04804.x>
9. Grinberg M., Mudrilova M., Kozlova E., Sukhova V., Sarafanova F., Evtushenko A. Effect of Extremely Low-Frequency Magnetic Fields on Light-Induced Electric Reactions in Wheat. *Plant Signaling & Behavior*. 2022;17(1):e2021664. <https://doi.org/10.1080/15592324.2021.2021664>
10. Maffei M.E. Magnetic Field Effects on Plant Growth, Development, and Evolution. *Frontiers in Plant Science*. 2014;(5):445. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00445>
11. Ahamed M.E.M., Elzaawely A.A., Bayoumi Y.A. Effect of Magnetic Field on Seed Germination, Growth and Yield of Sweet Pepper (*Capsicum annuum* L.). *Asian Journal of Crop Science*. 2013;5(3):286–294. <https://doi.org/10.3923/ajcs.2013.286.294>
12. Hussain M.S., Dastgeer G., Afzal A.M., Hussain S., Kanwar R.R. Eco-Friendly Magnetic Field Treatment to Enhance Wheat Yield and Seed Germination Growth. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*. 2020;14:100299. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100299>
13. Vashisth A., Nagarajan S. Exposure of Seeds to Static Magnetic Field Enhances Germination and Early Growth Characteristics in Chickpea (*Cicer Arietinum* L.). *Bioelectromagnetics*. 2008;29(7):571–578. <https://doi.org/10.1002/bem.20426>
14. Poinapen D., Toppozini L., Dies H., Brown D.C.W., Rheinstädter M.C. Static Magnetic Fields Enhance Lipid Order in Native Plant Plasma Membrane. *Soft Matter*. 2013;(9):6804–6813. <https://doi.org/10.1039/c3sm50355k>
15. Koukounaras A., Boursianis A., Kostas S., Theopoulos A., Bantis F., Samaras T. Pre-Sowing Static Magnetic Field Treatment of Vegetable Seeds and Its Effect on Germination and Young Seedlings Development. *Seeds*. 2023;2(4):394–405. <https://doi.org/10.3390/seeds2040030>
16. Savchenko V., Synyavsky O. Energy Dose of Flax Seed Treatment in a Magnetic Field. *Energy and Automation*. 2022;59(1). <https://doi.org/10.31548/energiya2022.01.005>
17. Efthimiadou A., Katsenios N., Karkanis A., Papastylianou P., Triantafyllidis V., Travlos I., et al. Effects of Presowing Pulsed Electromagnetic Treatment of Tomato Seed on Growth, Yield, and Lycopene Content. *The Scientific World Journal*. 2014;(1):369745 <https://doi.org/10.1155/2014/369745>

18. Menegatti R.D., de Oliveira L.O., Costa A.V.L., Braga E.J.B., Bianchi B.J. Magnetic Field and Gibberelic Acid as Pre-Germination Treatments of Passion Fruit Seeds. *Revista Ciência Agrícola*. 2019;17(1):15–22. <https://doi.org/10.28998/rca.v17i1.6522>
19. Bezerra E.A., Carvalho C.P.S., Costa Filho R.N., Silva A.F.B., Alam M., Sales M.V., et al. Static Magnetic Field Promotes Faster Germination and Increases Germination Rate of Calotropis Procera Seeds Stimulating Cellular Metabolism. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2023;49(1):102650. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102650>
20. Xia X., Pagano A., Macovei A., Padula G., Balestrazzi A., Hołubowicz R. Magnetic Field Treatment on Horticultural and Agricultural Crops: its Benefits and Challenges. *Folia Horticulturae*. 2024;36(1):67–80. <https://doi.org/10.2478/fhort-2024-0004>
21. Sari M.E., Demir I., Yildirim K., Memis N. Magnetopriming Enhance Germination and Seedling Growth Parameters of Onion and Lettuce Seeds. *International Journal of Agriculture, Environment and Food Sciences*. 2023;7(3):468–475. <https://doi.org/10.31015/jaefs.2023.3.1>
22. Sarraf M., Kataria S., Taimourya H., Santos L.O., Menegatti R.D., Jain M., et al. Magnetic Field (MF) Applications in Plants: An Overview. *Plants*. 2020;9(9):1139. <https://doi.org/10.3390/plants9091139>
23. Антипкина Л.А., Левин В.И., Борычев С.Н., Симдянкин А.А., Каширин Д.Е. Использование градиентного магнитного поля в предпосевной обработке семян огурца. *АгроЭкоИнфо*. 2022;(1):25. <https://doi.org/10.51419/202121123>
24. Yudaev I.V., Akimov A.A., Belenkov A.I., Plotnitsky I.O. Influence of Pre-Sowing Seed Treatment in a Magnetic Gradient Field on Growth, Development and Productivity of Long-Staple Flax. In: BIO Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2024). Kazan: EDP Sciences; 2025. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202516100062>

REFERENCES

1. Rozhmina T.A., Pavlova L.N., Ponazhev V.P., Zakharova L.M. Linen Industry on the Way to Revival. *Plant Protection and Quarantine*. 2018;(1):3–8. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/ynmxfe>
2. Basova N.V., Novikov E.V., Bezbabchenko A.V. Production and Processing of Bast Crops in Russia as an Element of Import Substitution. *AIC: Economics, Management*. 2022;(8):71–78. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33305/228-71>
3. Akimov A.A., Ivanyutina N.N., Vasiliev A.S., Drozdov I.A., Farinyuk Yu.T., Zaytsev S.S. Productivity Methods Increasing of Flax Varieties at Grown on Fallow Lands. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2019;(12):206–211. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17513/mjpf.12981>
4. Baev V.I., Yudaev I.V., Petrukhin V.A., Baev I.V., Prokofev P.V., Armyanov N.K. Electrotechnology as One of the Most Advanced Branches in the Agricultural Production Development. In: Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development. Hershey: IGI Global; 2018. pp. 149–175. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-3867-7.ch007>
5. Kazakova A.S., Yudaev I.V., Fedoischenko M.G., Mayboroda S.Yu., Ksenz N.V., Voronin S.M. New Approach to Study Stimulating Effect of the Pre-Sowing Barley Seeds Treatment in the Electromagnetic Field. *Online Journal of Biological Sciences*. 2018;18(2):197–207. <https://doi.org/10.3844/ojbsci.2018.197.207>
6. Dorokhov A.S., Chaplygin M.E., Aksenov A.G., Shibryaeva L.S., Blinov N.D., Chulkov A.S., et al. Grain Seed Treatment by a Low-Frequency Electromagnetic Field. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(4):4–11. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-4-4-11>
7. Khainovsky V.I., Kopylova O.S., Kozyrev A.E. Calculation of the Doses of Pulsed Electric Field on Seed Material. *Agrarnaya Rossiya*. 2012;(9):37–40. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2012-9-37-40>
8. Finlay C.C., Maus S., Beggan C.D., Bondar T.N., Chambodut A., Chernova T.A., et al. International Geomagnetic Reference Field: the Eleventh Generation. *Geophysical Journal International*. 2010;183(3):1216–1230. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04804.x>

9. Grinberg M., Mudrilova M., Kozlova E., Sukhova V., Sarafanova F., Evtushenko A. Effect of Extremely Low-Frequency Magnetic Fields on Light-Induced Electric Reactions in Wheat. *Plant Signaling & Behavior*. 2022;17(1):e2021664. <https://doi.org/10.1080/15592324.2021.2021664>
10. Maffei M.E. Magnetic Field Effects on Plant Growth, Development, and Evolution. *Frontiers in Plant Science*. 2014;(5):445. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00445>
11. Ahamed M.E.M., Elzaawely A.A., Bayoumi Y.A. Effect of Magnetic Field on Seed Germination, Growth and Yield of Sweet Pepper (*Capsicum annuum* L.). *Asian Journal of Crop Science*. 2013;5(3):286–294. <https://doi.org/10.3923/ajcs.2013.286.294>
12. Hussain M.S., Dastgeer G., Afzal A.M., Hussain S., Kanwar R.R. Eco-Friendly Magnetic Field Treatment to Enhance Wheat Yield and Seed Germination Growth. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*. 2020;14:100299. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100299>
13. Vashisth A., Nagarajan S. Exposure of Seeds to Static Magnetic Field Enhances Germination and Early Growth Characteristics in Chickpea (*Cicer Arietinum* L.). *Bioelectromagnetics*. 2008;29(7):571–578. <https://doi.org/10.1002/bem.20426>
14. Poinapen D., Toppozini L., Dies H., Brown D.C.W., Rheinstädter M.C. Static Magnetic Fields Enhance Lipid Order in Native Plant Plasma Membrane. *Soft Matter*. 2013;(9):6804–6813. <https://doi.org/10.1039/c3sm50355k>
15. Koukounaras A., Boursianis A., Kostas S., Theopoulos A., Bantis F., Samaras T. Pre-Sowing Static Magnetic Field Treatment of Vegetable Seeds and Its Effect on Germination and Young Seedlings Development. *Seeds*. 2023;2(4):394–405. <https://doi.org/10.3390/seeds2040030>
16. Savchenko V., Synyavsky O. Energy Dose of Flax Seed Treatment in a Magnetic Field. *Energy and Automation*. 2022;59(1). <https://doi.org/10.31548/energiya2022.01.005>
17. Efthimiadou A., Katsenios N., Karkanis A., Papastylianou P., Triantafyllidis V., Travlos I., et al. Effects of Presowing Pulsed Electromagnetic Treatment of Tomato Seed on Growth, Yield, and Lycopene Content. *The Scientific World Journal*. 2014;(1):369745 <https://doi.org/10.1155/2014/369745>
18. Menegatti R.D., de Oliveira L.O., Costa A.V.L., Braga E.J.B., Bianchi B.J. Magnetic Field and Gibberelic Acid as Pre-Germination Treatments of Passion Fruit Seeds. *Revista Ciência Agrícola*. 2019;17(1):15–22. <https://doi.org/10.28998/rca.v17i1.6522>
19. Bezerra E.A., Carvalho C.P.S., Costa Filho R.N., Silva A.F.B., Alam M., Sales M.V., et al. Static Magnetic Field Promotes Faster Germination and Increases Germination Rate of Calotropis Procera Seeds Stimulating Cellular Metabolism. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2023;49(1):102650. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102650>
20. Xia X., Pagano A., Macovei A., Padula G., Balestrazzi A., Hołubowicz R. Magnetic Field Treatment on Horticultural and Agricultural Crops: its Benefits and Challenges. *Folia Horticulturae*. 2024;36(1):67–80. <https://doi.org/10.2478/fhort-2024-0004>
21. Sari M.E., Demir I., Yildirim K., Memis N. Magnetopriming Enhance Germination and Seedling Growth Parameters of Onion and Lettuce Seeds. *International Journal of Agriculture, Environment and Food Sciences*. 2023;7(3):468–475. <https://doi.org/10.31015/jaefs.2023.3.1>
22. Sarraf M., Kataria S., Taimourya H., Santos L.O., Menegatti R.D., Jain M., et al. Magnetic Field (MF) Applications in Plants: An Overview. *Plants*. 2020;9(9):1139. <https://doi.org/10.3390/plants9091139>
23. Antipkina L.A., Levin V.I., Borychev S.N., Simdyankin A.A., Kashirin D.E. Use of a Gradient Magnetic Field in the Pre-Sowing Treatment of Cucumber Seeds. *AgroEcoInfo*. 2022;(1):25. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.51419/202121123>
24. Yudaev I.V., Akimov A.A., Belenkov A.I., Plotnitsky I.O. Influence of Pre-Sowing Seed Treatment in a Magnetic Gradient Field on Growth, Development and Productivity of Long-Staple Flax. In: BIO Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2024). Kazan: EDP Sciences; 2025. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202516100062>

Об авторах:

Юдаев Игорь Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроснабжения Кубанского государственного аграрного университета имени И. Т. Трубилина

(350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, д. 13), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3435-4873>, Researcher ID: GRF-0468-2022, Scopus ID: 57191251878, SPIN-код: 6836-5529, etsh1965@mail.ru

Акимов Алексей Алексеевич, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой агрохимии, земледелия и лесопользования Тверской государственной сельскохозяйственной академии (170904, Российская Федерация, г. Тверь, ул. Маршала Василевского (Сахарово), д. 7), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9363-6678>, Scopus ID: 57217391960, SPIN-код: 6890-2481, akimov-agro@yandex.ru

Скворцов Сергей Сергеевич, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры растениеводства и технологий переработки льна Тверской государственной сельскохозяйственной академии (170904, г. Тверь, ул. Маршала Василевского (Сахарово), д. 7), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8128-070X>, SPIN-код: 4243-4968, sskvorcov@tvghsha.ru

Иванютина Наталья Николаевна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры агробиотехнологий, перерабатывающих производств и семеноводства Тверской государственной сельскохозяйственной академии (170904, Российская Федерация, г. Тверь, ул. Маршала Василевского (Сахарово), д. 7), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6885-8607>, Scopus ID: 57221781403, SPIN-код: 3868-5960, nivanjutina@tvghsha.ru

Беленков Алексей Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, консультант федерального научного центра кормопроизводства и агроэкологии имени В. П. Вильямса (141055, Российская Федерация, г. Лобня, ул. Научный городок, к. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0422-4936>, Scopus ID: 57216614445, SPIN-код: 8397-1599, belenokaleksis@mail.ru

Плотницкий Игорь Олегович, инженер-исследователь, генеральный директор ООО «Объединение инноваций» (142000, Российская Федерация, г. Домодедово, ул. Октябрьская, д. 97), <https://orcid.org/0009-0002-8253-2985>, pio100@yandex.ru

Вклад авторов:

И. В. Юдаев – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; формулирование идеи исследования, целей и задач; критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений, визуализация результатов исследования и полученных данных.

А. А. Акимов – разработка или проектирование методологии исследования; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

С. С. Скворцов – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных.

Н. Н. Иванютина – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных.

А. И. Беленков – применение статистических, математических, вычислительных или других формальных методов для анализа, или синтеза данных исследования; формулирование исследования задач; критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений.

И. О. Плотницкий – разработка или проектирование методологии исследования; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 21.01.2026; поступила после рецензирования 25.02.2026;
принята к публикации 10.03.2026*

About the authors:

Igor V. Yudaev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of «Power supply», I. T. Trubilin Kuban State Agricultural University (13 Kalinin St., Krasnodar 350044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3435-4873>, Researcher ID: GRF-0468-2022, Scopus ID: 57191251878, SPIN-code: 6836-5529, etsh1965@mail.ru

Alexey A. Akimov, Cand.Sci (Agr.), Associate Professor, Head of the Department of Agrochemistry, Agriculture and Forest Management, Tver State Agricultural Academy (7 Marshal Vasilevsky St., (Sakharovo), Tver 170904, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9363-6678>, Scopus ID: 57217391960, SPIN-code: 6890-2481, akimov-agro@yandex.ru

Sergey S. Skvortsov, Cand.Sci (Agr.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Crop Production and Flax Processing Technologies, Tver State Agricultural Academy (7 Marshal Vasilevsky St., (Sakharovo), Tver 170904, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8128-070X>, SPIN-code: 4243-4968, sskvorcov@tvgsa.ru

Natalia N. Ivanyutina, Cand.Sci (Agr.), Associate Professor of the Department of Agrobiotechnology, Processing Industries and Seed Production, Tver State Agricultural Academy (7 Marshal Vasilevsky St., (Sakharovo), Tver 170904, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6885-8607>, Scopus ID: 57221781403, SPIN-code: 3868-5960, nivanjutina@tvgsa.ru

Aleksey I. Belenkov, Dr.Sci. (Agr.), professor, consultant, Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology (1 Nauchny Gorodok St., Lobnya 141055, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0422-4936>, Scopus ID: 57216614445, SPIN-code: 8397-1599, belenokaleksis@mail.ru

Igor O. Plotnitsky, research engineer, general director, Association of Innovations LLC (97 Oktyabrskaya St., Domodedovo 142000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8253-2985>, pio100@yandex.ru

Author contribution:

I. V. Yudaev – oversight and leadership responsibility for the research activity planning and execution, including mentorship external to the core team, formulation or evolution of overarching research goals and aims, preparation, preparation, creation of the published work by those from the original research group, specifically critical review, commentary or revision.

A. A. Akimov – development or design of methodology; conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data; preparation, creation of the published work, specifically visualization; preparation, creation of the published work, specifically writing the initial draft (including substantive translation).

S. S. Skvortsov – conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data collection.

N. N. Ivanyutina – conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data collection.

A. I. Belenkov – application of statistical, mathematical, computational, or other formal techniques to analyses or synthesize study data; formulation of overarching research goals and aims; preparation, creation of the published work by those from the original research group, specifically critical review, commentary or revision.

I. O. Plotnitsky – development or design of methodology; conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data collection.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 21.01.2026; revised 25.02.2026; accepted 10.03.2026