



## Влияние предпосадочной обработки слабыми неионизирующими импульсными полями на продуктивность и качество урожая сортов картофеля

© 2024. В. Г. Зайнуллин<sup>1</sup>, А. Н. Пожирицкая<sup>1</sup>, А. М. Турлакова<sup>✉</sup>,  
А. В. Партала<sup>2</sup>, О. В. Овчинников<sup>2</sup>, Е. В. Бондарчук<sup>2</sup>, И. Ф. Турканов<sup>2</sup>,  
Е. А. Галкина<sup>2</sup>, В. Г. Грязнов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт агробиотехнологий им. А. В. Журавского Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Сыктывкар, Республика Коми, Российская Федерация,

<sup>2</sup>Научный центр ОАО «Концерн «ГРАНИТ», г. Москва, Российская Федерация

Полевые исследования проводили в 2021–2023 гг. в условиях Республики Коми. Предпосадочной обработке слабыми неионизирующими импульсными переменными электромагнитными полями (ЭМП) подвергали клубни 9 сортов картофеля. Электромагнитное воздействие осуществляли устройством «ТОР-био» в режиме 15/5 (15 минут воздействия, 5 минут перерыва, три раза в день перед посадкой) с частотой импульса 125 Гц. Оценивали эффективность как однократной обработки в 2023 г., так и последствий ежегодных обработок ЭМП клубней урожая 2022 г. и их потомств 2021 и 2022 гг. Обнаружено, что эффективность действия переменного электромагнитного поля зависела от сорта. У чувствительных к обработке ЭМП сортов картофеля наблюдали более раннее появление массовых всходов (Печорский, Люкс, Терра) и повышение урожайности на 26–75 % (Легенда, Люкс, Мишка, Арго). У сортов Мишка и Люкс рост урожайности можно объяснить достоверно значимым ( $p \leq 0,05$ ) увеличением числа образующихся клубней в кусте после обработки ЭМП. В урожае сорта Печорский, полученного в 2023 г. от обработанных ЭМП клубней, отмечали повышенное содержание сухого вещества в осенне-весенний период хранения и крахмала – в осенний период. Анализ последствий многократной обработки клубней ЭМП выявил положительное влияние на интенсивность развития растений и качество урожая сорта Печорский местной селекции, что может свидетельствовать о возникновении устойчивых изменений его генотипа.

**Ключевые слова:** *Solanum tuberosum* L., электромагнитное излучение, развитие, урожайность

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (рег. № НИОКТР 123033000036-5) и АО «КОНЦЕРН ГРАНИТ» в рамках договора № 23000183 от 06.03.2023.

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку работы.

**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Зайнуллин В. Г., Пожирицкая А. Н., Турлакова А. М., Партала А. В., Овчинников О. В., Бондарчук Е. В., Турканов И. Ф., Галкина Е. А., Грязнов В. Г. Влияние предпосадочной обработки слабыми неионизирующими импульсными полями на продуктивность и качество урожая сортов картофеля. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(5):794–804. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.5.794-804>

Поступила: 26.02.2024

Принята к публикации: 07.10.2024

Опубликована онлайн: 30.10.2024

## The effect of pre-planting treatment with weak non-ionizing pulse fields on the productivity and quality of potato cultivars

© 2024. Vladimir G. Zainullin<sup>1</sup>, Aleksandra N. Pozhirickaya<sup>1</sup>, Antonina M. Turlakova<sup>✉</sup>,  
Alexander V. Partala<sup>2</sup>, Oleg V. Ovchinnikov<sup>2</sup>, Elena V. Bondarchuk<sup>2</sup>, Igor F. Turkanov<sup>2</sup>,  
Ekaterina A. Galkina<sup>2</sup>, Valery G. Gryaznov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>A. V. Zhuravsky Institute of Agro-Biotechnologies of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktuykar, Komi Republic, Russian Federation,

<sup>2</sup>Scientific Center of JSC Concern GRANIT, Moscow, Russian Federation

Field research was conducted in 2021–2023 in the conditions of the Komi Republic. Tubers of 9 potato cultivars were subjected to pre-treatment with weak non-ionizing pulsed alternating electromagnetic fields (EMF). The electromagnetic effect was carried out by the TOR-bio device in the 15/5 mode (15 minutes of exposure, 5 minutes of break, three times a day before planting) with a pulse frequency of 125 Hz. The effectiveness of both a single treatment in 2023 and the consequences of annual EMF treatments of tubers of the 2022 harvest and their offspring of 2021 and 2022 were evaluated. It was found that the effectiveness of the action of an alternating electromagnetic field depended on the cultivar. In EMF-sensitive potato cultivars, an earlier appearance of mass seedlings ('Pechorsky', 'Lux', 'Terra') and an increase in yield by 26–75 % ('Legenda', 'Lux', 'Mishka', 'Argo') were observed. The increase in the yield of 'Mishka' and 'Lux' cultivars can be explained by a fairly significant ( $p \leq 0,05$ ) increase in the number of tubers formed on the bush after EMF treatment. In the harvest of the 'Pechorsky' cultivar obtained in 2023 from EMF-treated tubers, an increased content of dry matter was noted in the autumn-spring storage period and starch in the autumn period. The analysis of the consequences of repeated EMF treatment of tubers revealed a

*positive effect on the intensity of plant development and the quality of the harvest of the 'Pechorsky' cultivar of local breeding, which may indicate the occurrence of stable changes in its genotype.*

**Keywords:** *Solanum tuberosum L., electromagnetic radiation, development, productivity*

**Acknowledgements:** the research was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Research Centre «Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences» (reg. No. R&D 123033000036-5) and JSC Concern GRANIT under contract No. 23000183 dated 03/06/2023.

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of the work.

**Conflict of interest:** the authors stated that there was no conflict of interest.

**For citation:** Zainullin V. G., Pozhirickaya A. N., Turlakova A. M., Partala A. V., Ovchinnikov O. V., Bondarchuk E. V., Turkanov I. F., Galkina E. A., Gryaznov V. G. The effect of pre-planting treatment with weak non-ionizing pulse fields on the productivity and quality of potato cultivars. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*. 2024;25(5):794–804. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.5.794-804>

Received: 26.02.2024

Accepted for publication: 07.10.2024

Published online: 30.10.2024

Возможность более полно реализовать генетический потенциал сорта обеспечивают не только погодные условия, но и благоприятный агрофон сельхозугодий. Комплексное внесение органических и минеральных удобрений является залогом повышения плодородия почв, однако длительное их применение может негативно отразиться на агрофизических свойствах почв, что особенно важно для агроценозов северных территорий.

Многочисленными исследованиями показано влияние электромагнитных полей на прорастание семян, биохимические, гормональные изменения, рост растений и урожайность [1]. Установлено, что воздействие низкочастотного электромагнитного поля на семена растений в период их покоя приводит к существенным физиолого-биохимическим изменениям при их прорастании. Как низкочастотное, так и высокочастотное электромагнитное поле способно привести к эффекту биостимуляции семян. Биохимические исследования семян после воздействия на них электромагнитного поля в режимах, приводящих к выраженным биологическим эффектам, показали повышение активности  $\alpha$ -амилазы, что свидетельствует об интенсификации процесса выхода гиббереллина, и активности гидролитического фермента кислой фосфатазы. Отклик семян на воздействие электромагнитного поля свидетельствует о принципиальной возможности электромагнитного управления ростовыми процессами [2].

Обработка семян пшеницы (*Triticum turgidum* L. ssp) магнитным полем с показателями 12,5 и 25,0 мТл в течение 6 дней с длительностью воздействия 15 и 30 мин в сутки выявила увеличение содержания воды, хлорофилла и каротиноидов в проростках, вегетирующих растениях пшеницы тучной. Установлена зависимость между экспрессией генов и соответствующими параметрами, особенно при магнитной индукции 25,0 мТл в течение 30 минут,

причем изменения наблюдали во всех генах по сравнению с контрольной группой [3].

Ряд исследований по влиянию КВЧ-излучения на метаболизм фотосинтезирующих организмов выявил его стимулирующее действие на важные физиологические процессы [4, 5, 6]. В эксперименте немецких исследователей оценивали модельное растение *Arabidopsis thaliana*, которое подвергали воздействию комбинированной программы переменного электромагнитного поля (ЭМП) в течение 48 часов [7]. Были выявлены четкие различия в параметрах фотосинтеза между обработанными и контрольными растениями. Анализ транскриптома выявил изменения в количестве транскриптов при воздействии ЭМП. Количественная ПЦР в реальном времени подтвердила дерегулирование некоторых процессов метаболизма ДНК. Более глубокими были изменения в размерах пула метаболитов с изменениями в фотосинтетическом и центральном энергетическом метаболизме.

Показано, что эффекты от воздействия ЭМП КВЧ-диапазона на растения зависят от параметров ЭМП, экспозиции и могут быть как стимулирующими, так и угнетающими [8, 9, 10, 11].

Необходимо отметить, что КВЧ-излучение относится к сверхслабым воздействиям, но, тем не менее, обладает большим потенциалом. Хотя при облучении количество поглощаемой объектом энергии ничтожно мало, эффект воздействия на живые объекты оказывался весьма впечатляющим, например, стимуляция выхода биомассы у цианобактерий может достигать двух и более раз [6]. Влияние КВЧ-излучения на биологические объекты имеет, как правило, резонансный характер, то есть частотную, временную и мощностную зависимость.

В нашей работе дана оценка эффективности технологии дистанционной электромагнитной обработки сортов картофеля слабыми неионизирующими импульсными полями.

**Цель исследований** – изучить влияние технологии предпосадочной обработки клубней картофеля слабыми неионизирующими импульсными переменными электромагнитными полями на скорость всходов, число образующихся клубней в кусте, урожайность и качество клубней сортов картофеля в условиях Республики Коми.

**Научная новизна** – впервые выполнен анализ последствий обработки клубней картофеля переменными электромагнитными полями. Полученные результаты позволят оценить перспективность для сельскохозяйственной практики технологий импульсных электромагнитных полей для повышения урожайности сортов картофеля.

**Материал и методы.** Исследования проводили на экспериментальных участках Института агробиотехнологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН в 2021–2023 гг.

По данным обследования 2023 года, почва экспериментального участка дерново-подзолистая, характеризуется следующими показателями:  $pH_{\text{сол}}$  – 4,98<sup>1</sup>, гидролитическая кислотность – 4,32 ммоль/100 г<sup>2</sup>, органическое вещество – 1,11 %<sup>3</sup>, обменный магний – 1,25 ммоль/100 г и обменный кальций – 8,25 ммоль/100 г<sup>4</sup>, подвижный фосфор – 729,2 мг/кг и обменный калий – 53,9 мг/кг<sup>5</sup>.

Аналитические работы на протяжении всего эксперимента (2021–2023 гг.) были выполнены лабораторией ФГБУ «Станция агрохимической службы «Сыктывкарская» и аналитической лабораторией Института агробиотехнологий ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

Содержание сухого вещества<sup>6</sup>, крахмала<sup>7</sup> и витамина С<sup>8</sup> определяли в клубнях картофеля урожая 2023 года, полученного в вариантах

опыта с предпосадочной обработкой клубней ЭМП и без обработки (контроль). Анализ клубней сортов местной селекции провели в начале хранения (ноябрь 2023 г.) и марте 2024 года. Анализ усредненной пробы от трех клубней выполнили в двух повторностях.

Закладка делянок проведена согласно общепринятой методике<sup>9</sup>. Схема посадки 0,7х0,3 м, однорядковые делянки (не менее 25 клубней в рядке) в 4-кратной повторности. Площадь однорядковой делянки 5,25 м<sup>2</sup>. Полевые наблюдения за сортами картофеля, статистическая обработка результатов исследований выполнена дисперсионным методом по Б. А. Доспехову<sup>10</sup> с использованием пакета AgCStat для программы EXCEL 2010.

Клубни картофеля перед посадкой подвергали электромагнитному воздействию аппаратом «ТОР-био» в режиме 15/5 (15 минут воздействия, 5 минут перерыв в течение 1 часа перед посадкой) с частотой импульса 125 Гц. Показатели периодического магнитного поля на расстоянии 10 см от излучателя аппарата «ТОР-био» не превышали значения 1,5 мкТл с точностью 0,22 мкТл, электрической компоненты излучения – не более значений 214 В/м с точностью 32 В/м, плотность мощности излучения на частоте 2,45 ГГц не превышала 36 мкВт/см<sup>2</sup> (ОАО «Концерн ГРАНИТ») [12, 13]. Выполнена оценка последствий предпосадочной обработки электромагнитными переменными полями клубней картофеля сортов – Печорский (1657-7) и Зырянец местной селекции среднеранних по группе спелости, а также селекции Уральского НИИСХ: ранние – Арго, Легенда,

<sup>1</sup>ГОСТ 26483-85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО.

М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1985. 6 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/738/4294827946.pdf>

<sup>2</sup>ГОСТ 26212-2021. Почвы. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена в модификации ЦИНАО.

М.: Российский институт стандартизации, 2021. 12 с.

URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/757/75796.pdf?ysclid=lzgn2836zq457430136>

<sup>3</sup>ГОСТ 26213-2021. Методы определения органического вещества. М.: Российский институт стандартизации, 2021.

11 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/758/75803.pdf?ysclid=lzgnagt4ob686092293>

<sup>4</sup>ГОСТ 26428-85. Почвы. Методы определения кальция и магния в водной вытяжке. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1985. С. 32–39. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/69b/4294828010.pdf?ysclid=lzgnx1tsu253983835>

<sup>5</sup>ГОСТ Р 54650-2011. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. М.: Стандартинформ, 2013. 11 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/32d/4293788445.pdf>

<sup>6</sup>ГОСТ 31640-2012. Корма. Методы определения содержания сухого вещества. М. Стандартинформ, 2012. 11 с.

URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293787/4293787414.pdf?ysclid=lzigi74b6s927537936>

<sup>7</sup>ГОСТ 26176-91. Корма, комбикорма. Методы определения растворимых и легкогидролизуемых углеводов.

М.: Межгосударственный стандарт. 9 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294828/4294828299.pdf>

<sup>8</sup>ГОСТ 24556-89. Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения витамина С. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003 (переиздание). 11 с.

URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294829/4294829760.pdf?ysclid=lzigyqm4a3144766926>

<sup>9</sup>Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований).

М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

<sup>10</sup>Там же.

Люкс, Мишка, Терра, среднеранние – Аляска и Шах. Сорты Крепыш (ранний по группе спелости) и Зырянец служили стандартом, так как рекомендованы к использованию по I (Северному) региону. Электромагнитному воздействию подвергали клубни урожая 2022 г. и потомство клубней, обработанных ЭМП в 2021 и 2022 гг.

Оценка метеорологических условий 2021 и 2022 гг. выполнена на основании данных, предоставленных Центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды г. Сыктывкара, 2023 г. – по данным сайта <http://www.pogodaiklimat.ru/> (рис. 1).

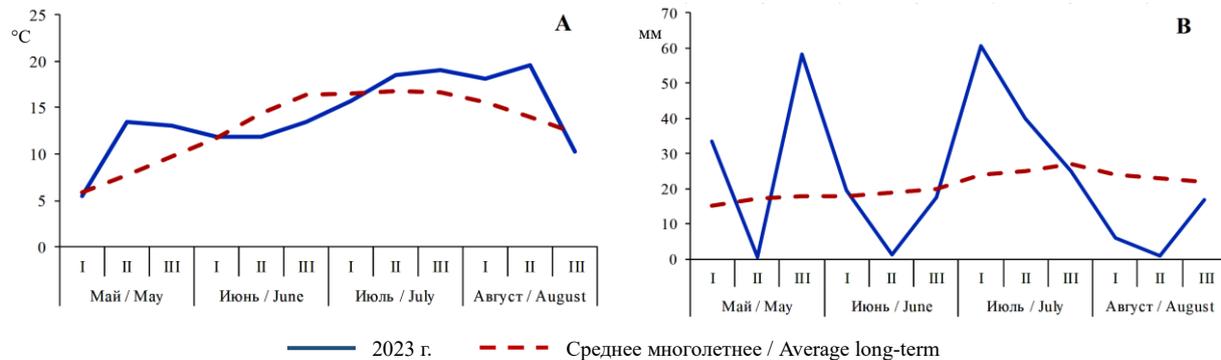


Рис. 1. Динамика среднесуточной температуры воздуха (А) и количества осадков (В) в вегетационный период 2023 г. /

Fig. 1. Dynamics of the average daily air temperature (A) and precipitation (B) in the growing season of 2023

Метеоусловия вегетационного периода 2021 г. заметно отличались от многолетних наблюдений как по температуре воздуха, так и атмосферным осадкам. Среднесуточная температура воздуха в целом за вегетационный период была на 2,7 °С выше, при этом резких перепадов не наблюдали.

За вегетационный период 2022 года (май–август) средняя температура воздуха составила 16,1 °С (норма 13,1 °С), осадков выпало 244,0 мм при средней многолетней норме 252,0 мм.

Благоприятный температурный и влажностный режим мая 2023 г. обеспечил достаточно раннюю посадку картофеля (25.05.2023) в сравнении с 2022 г. (07.06.2022). За июнь 2023 г. средняя температура воздуха составила 12,36 °С, что на 1,84 °С ниже средней многолетней нормы, количество осадков выпало ниже средней многолетней на 38,2 мм, что отрицательно отразилось на ранней стадии развития картофеля – период появления всходов растянулся. Июль характеризовался относительно равномерным температурным режимом в течение месяца. Средняя температура воздуха за июль составила 19,1 °С, что на 2,47 °С выше средней многолетней нормы, в августе средняя температура (15,99 °С) превысила среднемноголетнее значение на 0,68 °С за данный период, а количество осадков выпало на 45,5 мм меньше среднего многолетнего показателя. Прохладный июнь и

недостаток влаги в первую половину лета, превышение температуры и дефицит влаги в августе отрицательно сказались на качественных показателях урожая картофеля.

**Результаты и их обсуждение.** Динамика всходов картофеля после обработки клубней импульсными электромагнитными полями в 2023 г. (Э), в 2021, 2022, 2023 гг. (ТЭ) и контрольных (К) – необработанных показана на рисунке 2. Как видно из рисунка 2, более интенсивную динамику всходов (свыше 60 % через три недели от посадки) наблюдали у сорта Печорский при обработке клубней ЭМП в 2023 г. (Э) в сравнении с вариантами без обработки (К) и после обработки ЭМП в 2021, 2022 и 2023 г. (ТЭ), а также с характером всходов сорта Зырянец по вариантам опыта (менее 20 % всходов на третьей неделе от посадки). Среди сортов уральской селекции под воздействием обработки ЭМП (2023 г.) резко увеличили интенсивность всходов клубни картофеля сорта Люкс, отмечена положительная динамика у сортов Аляска и Терра, которые имели более продолжительный довсходовый период.

Реакция сортов картофеля оригинальной селекции № 1657-7 (Печорский) и Зырянец на обработку клубней ЭМП (табл. 1) была аналогичной результатам, полученным ранее в 2021 и 2022 годах [14] – для сортообразца Печорский эффективность однократной обработки, опре-

деляемой по среднему весу клубней на куст, была выше, чем в контроле ( $p \leq 0,05$ ). Выявлена тенденция увеличения количества клубней на куст. В отличие от сортообразца Печорский,

результаты учета раннего урожая сорта Зырянец свидетельствуют о значимом увеличении числа клубней и незначительном – среднего веса клубней на куст у обработанного ЭМП варианта.

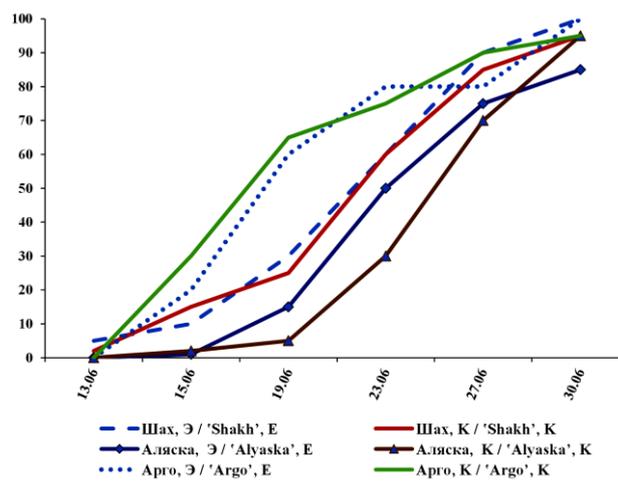
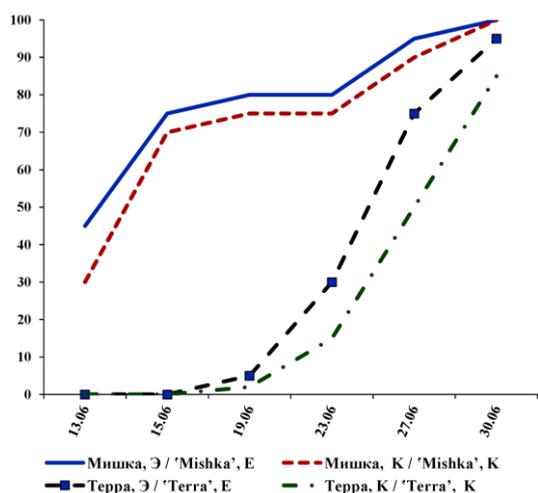
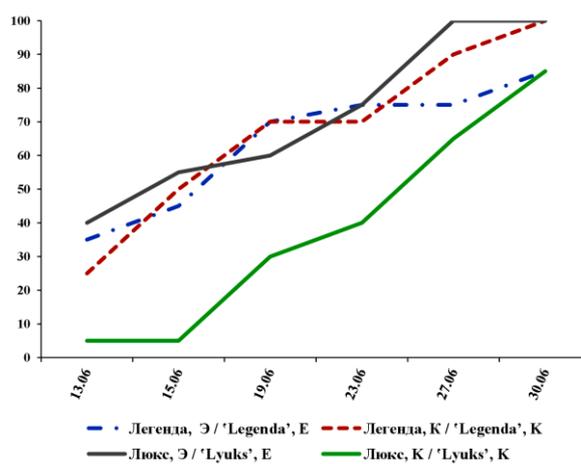
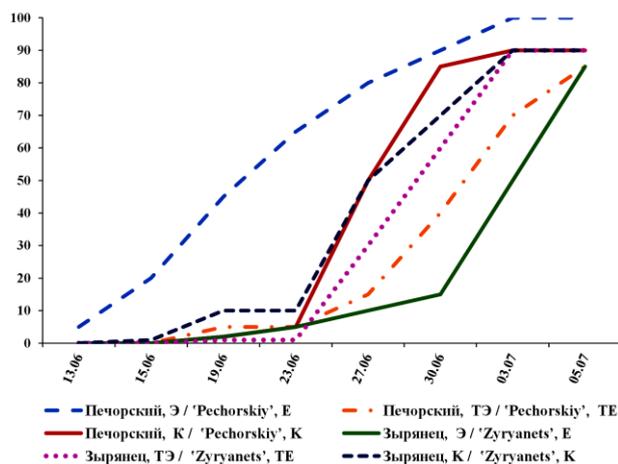


Рис. 2. Динамика всходов сортов картофеля после обработки ЭМП, %: Э – обработка 2023 г., ТЭ – обработка 2021, 2022, 2023 гг., К – контроль /

Fig. 2. Dynamics of seedlings of potato cultivars after EMF treatment (%): E – treatment in 2023, TE – treatment in 2021, 2022, 2023, K – control

Анализ реакции сортов селекции Уральского НИИСХ на обработку ЭМП выявил, что сорта Мишка и Люкс положительно отреагировали на обработку ЭМП, значительно увеличив вес клубней на куст (на 0,05–0,10 кг соответственно при  $НСР_{05} = 0,05$  кг). Тенденцию к повышению числа клубней на куст наблюдали у ранних сортов Мишка, Люкс, Terra и Argo. Для среднеранних сортов Аляска и Шах такой зависимости не выявлено, более того, как видно из таблицы 1, результаты свидетельствуют о снижении показателей в варианте с обработкой клубней ЭМП.

Учет общей урожайности сортов местной селекции показал, что обработка ЭМП незначительно повысила урожайность у сорта Печорский 18,6 т/га против 17,6 т/га в контроле и способствовала снижению общей урожайности сорта Зырянец – 11,4 против 12,1 т/га соответственно (рис. 3). Воздействие в 2023 году ЭМП на клубни сортообразца Печорский – потомства клубней, обработанных ЭМП в 2021 и 2022 гг., привело к достоверно значимому снижению общей урожайности – 9,5 т/га против 17,6 т/га в контроле ( $НСР_{05} = 2,2$ ), у сорта Зырянец, наоборот, наблюдали тенденцию к увеличению общей урожайности – 15,9, в контроле – 12,1 т/га ( $НСР_{05} = 2,8$ ).

**ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ: РАСТЕНИЕВОДСТВО / ORIGINAL SCIENTIFIC ARTICLES: PLANT GROWING**

Таблица 1 – Влияние предпосадочной обработки ЭМП на формирование раннего урожая сортов картофеля (65-й день после посадки) (2023 г.) /

Table 1 – The effect of pre-planting EMF treatment on the formation of an early crop of potato cultivars (65th day after planting) (2023)

| <i>Сорт / Cultivar</i>                | <i>Количество основных стеблей, шт / Number of main stems, pcs.</i> | <i>Высота растений, см / Plant height cm</i> | <i>Вес ботвы, кг/куст / Weight of the tops, kg/bush</i> | <i>Кол-во клубней, шт/куст / Number of tubers, pcs/bush</i> | <i>Вес клубней, кг/куст / Weight of tubers, kg/bush</i> |
|---------------------------------------|---|--|---|---|---|
| Печорский, К / 'Pechorskiy', К        | 3,5±0,6   | 48,5±2,0                                     | 0,20±0,03   | 7,5±1,8   | 0,15±0,04   |
| Печорский, Э / 'Pechorskiy', Е        | 3,5±0,6   | 52,5±3,8                                     | 0,30±0,04   | 10,5±2,5  | 0,34±0,05   |
| НСР <sub>05</sub> / LSD <sub>05</sub> | 3,4   | 16,6   | 0,23  | 9,9   | 0,25  |
| Зырянец, К / 'Zyryanets', К           | 2,5±0,5   | 48,8±6,6                                     | 0,21±0,08   | 4,5±1,2   | 0,16±0,06   |
| Зырянец, Э / 'Zyryanets', К           | 3,5±0,9   | 50,0±2,0                                     | 0,20±0,02   | 10,8±1,9  | 0,18±0,02   |
| НСР <sub>05</sub> / LSD <sub>05</sub> | 3,4   | 20,1   | 0,28  | 9,9   | 0,23  |
| Легенда, К / 'Legenda', К             | 3,0±0,7   | 51,7±4,0                                     | 0,13±0,02   | 9,8±1,6   | 0,27±0,05   |
| Легенда, Э / 'Legenda', Е             | 2,0±0,4   | 52,5±3,2                                     | 0,19±0,03   | 8,5±0,5   | 0,34±0,06   |
| НСР <sub>05</sub> / LSD <sub>05</sub> | 2,6   | 18,8   | 0,15  | 5,1   | 0,31  |
| Люкс, К / 'Lyuks', К                  | 2,8±0,5   | 52,5±4,3                                     | 0,10±0,04   | 6,0±2,3   | 0,09±0,04   |
| Люкс, Э / 'Lyuks', Е                  | 3,7±0,9   | 49,3±1,9                                     | 0,10±0,03   | 9,3±1,2   | 0,19±0,06*  |
| НСР <sub>05</sub> / LSD <sub>05</sub> | 3,9   | 11,0   | 0,10  | 6,2   | 0,04  |
| Мишка, К / 'Mishka', К                | 2,8±0,5   | 50,1±2,2                                     | 0,21±0,03   | 9,5±1,5   | 0,20±0,04   |
| Мишка, Э / 'Mishka', Е                | 3,8±0,3   | 56,3±3,8                                     | 0,25±0,04   | 12,5±0,3  | 0,25±0,04*  |
| НСР <sub>05</sub> / LSD <sub>05</sub> | 1,3   | 12,1   | 0,16  | 4,7   | 0,05  |
| Терра, К / 'Terra', К                 | 2,0±0,6   | 42,5±3,2                                     | 0,18±0,04   | 6,8±2,4   | 0,30±0,05   |
| Терра, Э / 'Terra', Е                 | 2,0±0,4   | 45,0±0,4                                     | 0,17±0,02   | 8,8±2,1   | 0,28±0,04   |
| НСР <sub>05</sub> / LSD <sub>05</sub> | 1,3   | 10,3   | 0,11  | 10,3  | 0,12  |
| Арго, К / 'Argo', К                   | 2,0±0,6   | 51,8±2,7                                     | 0,26±0,03   | 7,3±0,6   | 0,31±0,03   |
| Арго, Э / 'Argo', Е                   | 2,0±0,7   | 46,3±2,4                                     | 0,16±0,02   | 11,3±2,0  | 0,35±0,05   |
| НСР <sub>05</sub> / LSD <sub>05</sub> | 3,9   | 6,7  | 0,15  | 7,3   | 0,23  |
| Крепыш, К / 'Krepish', К              | 2,8±0,9   | 58,8±5,7                                     | 0,15±0,01   | 7,3±1,2   | 0,25±0,03   |
| Крепыш, Э / 'Krepish', Е              | 2,0±0,5   | 52,5±5,2                                     | 0,1±0,05  | 7,6±1,0   | 0,21±0,04   |
| НСР <sub>05</sub> / LSD <sub>05</sub> | 3,9   | 7,6  | 0,1   | 10,5  | 0,17  |
| Шах, К / 'Shakh', К                   | 3,3±0,3   | 58,9±1,3                                     | 0,16±0,02   | 11±2,2  | 0,21±0,02   |
| Шах, Э / 'Shakh', Е                   | 2,5±0,3   | 52,5±1,3                                     | 0,18±0,01   | 5,8±0,9   | 0,20±0,02   |
| НСР <sub>05</sub> / LSD <sub>05</sub> | 1,5   | 7,6  | 0,01  | 8,5   | 0,09  |
| Аляска К / 'Alyaska', К               | 3,0±0,7   | 52,5±3,2                                     | 0,18±0,03   | 11,8±3,1  | 0,27±0,07   |
| Аляска, Э / 'Alyaska', Е              | 1,0±0,0   | 56,3±2,4                                     | 0,20±0,04   | 7,3±1,1   | 0,20±0,04   |
| НСР <sub>05</sub> / LSD <sub>05</sub> | 2,3   | 13,6   | 0,17  | 12,6  | 0,36  |

Примечания: К – контроль без обработки; Э – обработка ЭМП: \* варианты, значительно отличающиеся от контроля при p ≤ 0,05 /

Notes: К – control without treatment; Е – EMF treatment: \* variants significantly different from the control at p < 0.05

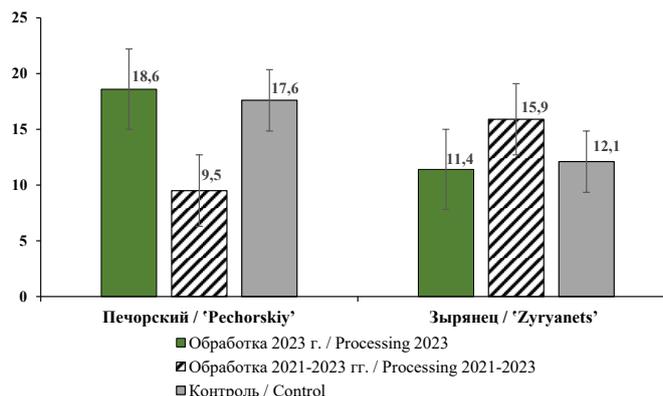


Рис. 3. Влияние предпосадочной обработки ЭМП на общую урожайность сортов картофеля местной селекции, т/га /  
Fig. 3. The effect of pre-planting EMF treatment on the overall yield of locally bred potato cultivars, t/ha

Известно, что факторы окружающей среды могут вызывать изменения в метилировании ДНК, ацетилировании или метилировании гистонов, т. е. приводить к эпигенетическим изменениям, которые отражают адаптацию к новым условиям. Были показаны изменения в метилировании ДНК после воздействия на пшеницу (*Triticum aestivum* L.) нетепловым воздействием чрезвычайно высокой частоты (45–53 ГГц) в течение 40 минут [15]. Крупномасштабный анализ протеоформ, дифференциально экспрессирующихся после воздействия ЭМП, наблюдали у подсолнечника обыкновенного (*Helianthus annuus* L.) [16]. Было подтверждено, что кратковременное (5–15 минут) воздействие на растения подсолнечника ЭМП частотой 5,28 МГц является эффективным сигналом окружающей среды, который изменяет содержание почти 100 белков (большинство из них

связано с фотосинтезом), лежащих в основе изменений экспрессии генов. Таким образом, можно предположить, что в результате многократного воздействия ЭМП на семена (клубни) картофеля сорта Печорский и, в меньшей степени, сорта Зырянец, могли возникнуть устойчивые изменения генотипа, реализуемые в отличиях реакций на дополнительные действия факторов среды у нативных и обработанных образцов.

Существенно увеличили общую урожайность при обработке ЭМП сорта Арго (на 9,4 т/га, НСР<sub>05</sub> = 5,7 т/га) и Мишка (на 2,7 т/га, НСР<sub>05</sub> = 2,6 т/га), положительная тенденция отмечена у сорта Люкс (на 4,2 т/га, НСР<sub>05</sub> = 5,18 т/га) (рис. 4). Обработка ЭМП привела к статистически значимому снижению общей урожайности среднераннего сорта Шах (на 1,3 т/га, НСР<sub>05</sub> = 0,13 т/га) и среднеспелого Аляска (на 3,3 т/га, НСР<sub>05</sub> = 2,13 т/га).

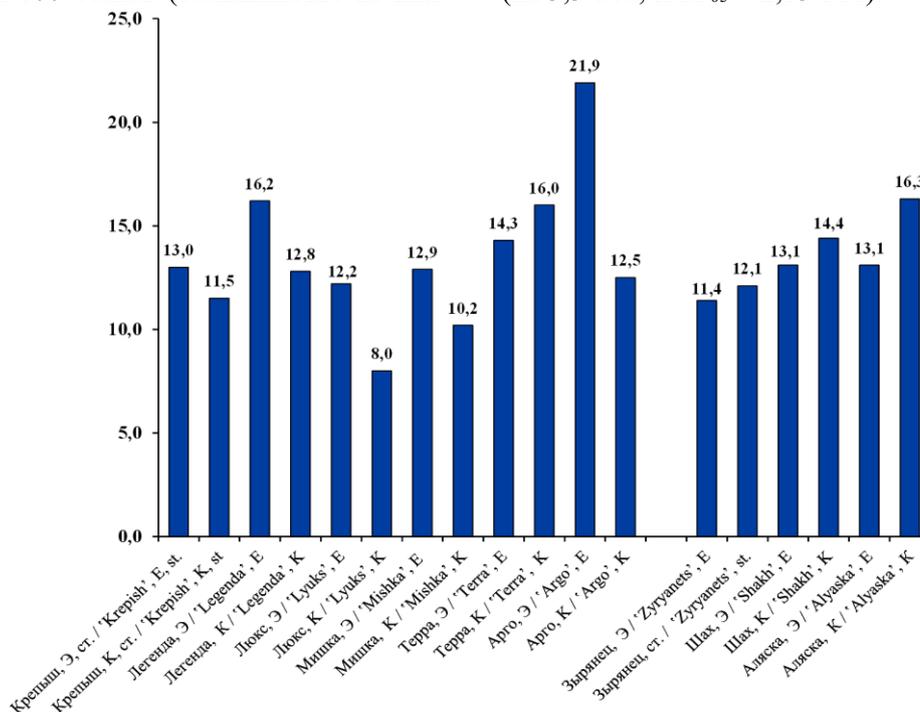


Рис. 4. Влияние предпосадочной обработки ЭМП на общую урожайность сортов картофеля селекции Уральского НИИСХ (2023 г.), т/га /

Fig. 4. The effect of pre-planting EMF treatment on the total yield of potato cultivars bred by the Ural Research Institute (2023), t/ha

В таблице 2 представлены данные оценки содержания сухого вещества, крахмала и витамина С в клубнях картофеля урожая 2023 года, полученного от обработанных клубней и контрольных вариантов. Как видно из результатов, за период хранения картофеля происходит увеличение содержания сухого вещества, крахмала и снижается количество витамина С. Следует

отметить, что обработка ЭМП привела к снижению содержания сухого вещества, крахмала и витамина С в клубнях картофеля сорта Зырянец в период осенне-весеннего хранения. У сорта Печорский в варианте с предпосевной обработкой ЭМП наблюдали повышенное содержание сухого вещества в осенне-весенний период хранения и крахмала – в осенний период.

*Таблица 2 – Влияние однократной обработки ЭМП на показатели качества клубней картофеля сортов местной селекции /*

*Table 2 – The effect of a single EMF treatment on the quality indicators of potato tubers of locally bred cultivars*

| Сорт /<br>Cultivar                | Сухое вещество, % /<br>Dry matter, % |                                | Крахмал, % /<br>Starch, %      |                                | Витамин С, мг% /<br>Vitamin C, mg% |                                |
|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
|                                   | осень 2023 г. /<br>autumn 2023       | весна 2024 г. /<br>spring 2024 | осень 2023 г. /<br>autumn 2023 | весна 2024 г. /<br>spring 2024 | осень 2023 г. /<br>autumn 2023     | весна 2024 г. /<br>spring 2024 |
| Зырянец, К /<br>'Zyryanets', К    | 25,5                                 | 29,0                           | 18,2                           | 20,3                           | 17,6                               | 10,7                           |
| Зырянец, Э /<br>'Zyryanets', Е    | 19,2                                 | 22,2                           | 10,5                           | 16,2                           | 15,5                               | 11,8                           |
| Печорский, К /<br>'Pechorskiy', К | 22,6                                 | 23,3                           | 13,8                           | 15,1                           | 18,6                               | 10,2                           |
| Печорский, Э /<br>'Pechorskiy', Е | 24,5                                 | 26,4                           | 16,3                           | 13,2                           | 17,6                               | 9,3                            |

**Выводы.** Проведенные исследования по изучению влияния предпосадочной обработки слабыми неионизирующими импульсными полями на показатели продуктивности и качества сортов картофеля в почвенно-климатических условиях Республики Коми показали:

1. При однократной обработке ЭМП отмечена более интенсивная динамика всходов картофеля сортов Печорский и Люкс (свыше 60 % через три недели от посадки) и относительно слабая положительная динамика у Аляска и Терра.

2. На 65-й день после посадки под влиянием обработки клубней картофеля переменными электромагнитными полями отмечена тенденция увеличения количества клубней на куст у всех испытываемых сортов – на 2,0 шт. (Терра), 3,0 (Мишка и Печорский), 3,3 (Люкс), 4 (Арго), 6,3 шт. (Зырянец). У сортов Легенда, Аляска, Шах отмечено незначительное снижение числа клубней на куст – на 1,3; 4,5 и 5,2 шт. соответственно.

3. Положительно отреагировали на обработку ЭМП сорта Мишка и Люкс, существенно

увеличив вес клубней соответственно на 0,05 и 0,10 кг/куст.

4. По показателям общей урожайности эффективнее реагировали на обработку слабыми неионизирующими импульсными переменными электромагнитными полями сорта Мишка и Арго (статистически значимое повышение на 2,7 и 9,4 т/га соответственно). Обработка ЭМП привела к достоверному снижению урожайности среднераннего сорта Шах и среднеспелого сорта Аляска на 1,3 и 3,3 т/га соответственно.

5. Предварительные данные по влиянию предпосевной обработки ЭМП на качество урожая показали, что клубни картофеля сорта Печорский содержали повышенное количество сухого вещества (24,5–26,4 %) в осенне-весенний период хранения, крахмала (16,3 %) в осенний период по сравнению с контролем (22,6–23,3 % и 13,8 % соответственно).

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования предпосадочной обработки клубней картофеля ЭМП с учетом сортовой специфики.

*Список литературы*

1. Radhakrishnan R. Magnetic field regulates plant functions, growth and enhances Tolerance against environmental stresses. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2019;25(5):1107–1119. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12298-019-00699-9>
2. Калинин Л. Г., Бошкова И. Л., Панченко Г. И., Коломийчук С. Г. Влияние низкочастотного и высокочастотного электромагнитного поля на семена. *Биофизика*. 2005;50(2):361–366.
3. Erez M. E., Özbek M. Magnetic field effects on the physiologic and molecular pathway of wheat (*Triticum turgidum* L.) germination and seedling growth. *Acta Physiologiae Plantarum*. 2024;46(5). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11738-023-03631-7>
4. Ли Ю. В., Терехова Л. П., Алферова И. В., Галатенко О. А., Гапочка М. Г. Применение сукцессионного анализа в комбинации с КВЧ-излучением для селективного выделения актиномицетов из почвы. *Микробиология*. 2003;72(1):131–135.
5. Тамбиев А. Х., Кирикова Н. Н. Некоторые новые представления о причинах формирования стимулирующих эффектов КВЧ-излучения. *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2000;(1):23–33.
6. Тамбиев А. Х., Кирикова Н. Н., Бецкий О. В., Гуляев Ю. В. Миллиметровые волны и фотосинтезирующие организмы. М.: Радиотехника, 2003. 472 с.
7. Schmidtpott S. M., Danho S., Kumar V., Seidel T., Schöllhorn W., Dietz K.-J. Scrutinizing the Impact of Alternating Electromagnetic Fields on Molecular Features of the Model Plant *Arabidopsis thaliana*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19(9):5144. DOI: <https://doi.org/10.3390/IJERPH19095144>
8. Мазец Ж. Э., Кайзинович К. Я., Пушкина Н. В., Родионова В. Н., Спиридович Е. В. Влияние низкоинтенсивного электромагнитного излучения на активность амилазы в проростках *Lupinus angustifolius* L. Труды Белорусского государственного университета. Серия: Физиологические, биохимические и молекулярные основы функционирования биосистем. 2013;8(2):95–101. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44388018> EDN: UEIDBX
9. Мазец Ж. Э., Кайзинович К. Я., Шутова А. Г. К вопросу о механизмах взаимодействия низкоинтенсивного электромагнитного излучения с растительными объектами. *Вестні БДПУ Серія 3. Фізика, матэматыка, інфарматыка, біялогія, геаграфія*. 2014;(1):26–31. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38207219> EDN: ZSWQLJ
10. Калье М. И. Влияние КВЧ – излучения миллиметрового диапазона на физиологические процессы прорастания семян пивоваренного ячменя. *Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского*. 2010;(2-2):399–401. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15529278> EDN: NBNVBF
11. Radhakrishnan R. See pretreatment with magnetic field alters the storage proteins and lipid profiles in harvested soybean seeds. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2018;24(2):343–347. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12298-018-0505-8>
12. Устройство для подавления жизнедеятельности патогенных микроорганизмов и вирусов электромагнитным излучением: патент №2765973 Российская Федерация. № 2020124927; заявл. 27.07.2020; опубл. 07.02.2022. Бюл. № 4. 7 с. Режим доступа: <https://patentimages.storage.googleapis.com/47/71/dd/8682b68ce2ece0/RU2765973C1.pdf>
13. Способ подавления жизнедеятельности патогенных микроорганизмов и вирусов электромагнитным излучением: патент №2766002 Российская Федерация. № 2020124570; заявл. 23.07.2020; опубл. 07.02.2022. Бюл. № 4. 6 с. Режим доступа: [https://patents.s3.yandex.net/RU2766002C1\\_20220207.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2766002C1_20220207.pdf)
14. Бондарчук Е. В., Овчинников О. В., Турканов И. Ф., Партала А. В., Шульгина Е. А., Селиверстов А. Ф., Казыберова А. Ю., Зайнуллин В. Г., Юдин А. А. Слабые импульсные электромагнитные поля повышают урожайность и иммунитет картофеля. *Картофель и овощи*. 2023;(4):35–40. DOI: <https://doi.org/10.25630/PAV.2023.91.50.004> EDN: LUTKWA
15. Aydin M., Taspinar M.S., Cakmak Z. E., Dumlupinar R., Agar G. Static magnetic field induced epigenetic changes in wheat callus. *Bioelectromagnetics*. 2016;37(7):504–511. DOI: <https://doi.org/10.1002/bem.21997>
16. Mildažienė V., Aleknavičiūtė V., Žūkienė R., Paužaitė G., Naučienė Z., Filatova I., et al. Treatment of common sunflower (*Helianthus annuus* L) seeds with radio-frequency electromagnetic field and cold plasma induces changes in seed phytohormone balance, seedling development and leaf protein expression. *Scientific Reports*. 2019;9(1):6437. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42893-5>

*References*

1. Radhakrishnan R. Magnetic field regulates plant functions, growth and enhances Tolerance against environmental stresses. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2019;25(5):1107–1119. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12298-019-00699-9>
2. Kalinin L. G., Boshkova I. L., Panchenko G. I., Kolomiychuk S. G. Influence of low-frequency and microwave electromagnetic fields on seeds. *Biofizika = Biophysics*. 2005;50(2):361–366. (In Russ.).

3. Erez M. E., Özbek M. Magnetic field effects on the physiologic and molecular pathway of wheat (*Triticum turgidum* L.) germination and seedling growth. *Acta Physiologiae Plantarum*. 2024;46(5). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11738-023-03631-7>
4. Li Yu. V., Terekhova L. P., Alferova I. V., Galatenko O. A., Gapochka M. G. The application of succession analysis in combination with ehf irradiation to the selective isolation of actinomycetes from soil. *Mikrobiologiya*. 2003;72(1):131–135. (In Russ.).
5. Tambiev A. Kh., Kirikova N. N. Some new ideas about the reasons for the formation of stimulating effects of EHF radiation. *Biomeditsinskaya radioelektronika* = Journal Biomedical Radioelectronics. 2000;(1):23–33. (In Russ.).
6. Tambiev A. Kh., Kirikova N. N., Betskiy O. V., Gulyaev Yu. V. Millimeter waves and photosynthetic organisms. Moscow: *Radiotekhnika*, 2003. 472 p.
7. Schmidtpott S. M., Danho S., Kumar V., Seidel T., Schöllhorn W., Dietz K.-J. Scrutinizing the Impact of Alternating Electromagnetic Fields on Molecular Features of the Model Plant *Arabidopsis thaliana*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19(9):5144. DOI: <https://doi.org/10.3390/IJERPH19095144>
8. Mazets Zh. E., Kayzinovich K. Ya., Pushkina N. V., Rodionova V. N., Spiridovich E. V. Effect of low-intensity electromagnetic radiation on amylase activity in seedlings of *Lupinus angustifolius* L. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fiziologicheskie, biokhimicheskie i molekulyarnye osnovy funktsionirovaniya biosistem* = Proceedings of the Belarusian State University. Series of Physiological, Biochemical and Molecular Biology Sciences. 2013;8(2):95–101. (In Belarus). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44388018>
9. Mazets Zh. E., Kayzinovich K. Ya., Shutova A. G. On the issue of the mechanisms of interaction of low-intensity electromagnetic radiation with plant objects. *Vestsi BDPU Seryya 3. Fizika, matematyka, infarmatyka, biyalogiya, geografiya*. 2014;(1):26–31. (In Belarus). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38207219>
10. Kale M. I. Effect of EHF radiation on physiological processes of brewer's barley seed germination. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo* = Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod. 2010;(2-2):399–401. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15529278>
11. Radhakrishnan R. See pretreatment with magnetic field alters the storage proteins and lipid profiles in harvested soybean seeds. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2018;24(2):343–347. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12298-018-0505-8>
12. Device for suppressing the vital activity of pathogenic microorganisms and viruses by electromagnetic radiation: patent RF no. 2765973. 2022. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/47/71/dd/8682b68ce2ece0/RU2765973C1.pdf>
13. A method of suppressing the vital activity of pathogenic microorganisms and viruses by electromagnetic radiation: patent RF no. 2020124927. 2022. URL: [https://patents.s3.yandex.net/RU2766002C1\\_20220207.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2766002C1_20220207.pdf)
14. Bondarchuk E. V., Ovchinnikov O. V., Turkanov I. F., Partala A. V., Shulgina E. A., Seliverstov A. F., Kazyberova A. Yu., Zaynullin V. G., Yudin A. A. Weak pulsed electromagnetic fields enhance potato yield and immunity. *Kartofel' i ovoshchi* = Potato and Vegetables. 2023;(4):35–40. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25630/PAV.2023.91.50.004>
15. Aydin M., Taspinar M.S., Cakmak Z. E., Dumlupinar R., Agar G. Static magnetic field induced epigenetic changes in wheat callus. *Bioelectromagnetics*. 2016;37(7):504–511. DOI: <https://doi.org/10.1002/bem.21997>
16. Mildažienė V., Aleknavičiūtė V., Žūkienė R., Paužaitė G., Naučienė Z., Filatova I., et al. Treatment of common sunflower (*Helianthus annuus* L) seeds with radio-frequency electromagnetic field and cold plasma induces changes in seed phytohormone balance, seedling development and leaf protein expression. *Scientific Reports*. 2019;9(1):6437. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42893-5>

#### *Сведения об авторах*

**Зайнуллин Владимир Габдуллович**, доктор биол. наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Институт агробиотехнологий им. А. В. Журавского Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, Ручейная, д. 27, г. Сыктывкар, Республика Коми, Российская Федерация, 167023, e-mail: [nipti@bk.ru](mailto:nipti@bk.ru),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9378-1170>

**Пожирицкая Александра Николаевна**, младший научный сотрудник, Институт агробиотехнологий им. А. В. Журавского Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, Ручейная, д. 27, г. Сыктывкар, Республика Коми, Российская Федерация, 167023, e-mail: [nipti@bk.ru](mailto:nipti@bk.ru),  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8869-4963>

✉ **Турлакова Антонина Марсовна**, младший научный сотрудник, Институт агробиотехнологий им. А. В. Журавского Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, Ручейная, д. 27, г. Сыктывкар, Республика Коми, Российская Федерация, 167023, e-mail: [nipti@bk.ru](mailto:nipti@bk.ru),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8038-6534>, e-mail: [turlakova100krapt@mail.ru](mailto:turlakova100krapt@mail.ru)

**Партала Александр Владимирович**, специалист научного отдела, главный научный сотрудник, Научный центр ОАО «Концерн «ГРАНИТ», б-р Гоголевский, д. 31, стр. 2, г. Москва, Российская Федерация, 119019, e-mail: [info@granit-concern.ru](mailto:info@granit-concern.ru)

**Овчинников Олег Вячеславович**, сотрудник научного отдела, председатель совета директоров, Научный центр ОАО «Концерн «ГРАНИТ», б-р Гоголевский, д. 31, стр. 2, г. Москва, Российская Федерация, 119019, e-mail: [info@granit-concern.ru](mailto:info@granit-concern.ru)

**Бондарчук Елена Владимировна**, вице-президент, Научный центр ОАО «Концерн «ГРАНИТ», б-р Гоголевский, д. 31, стр. 2, г. Москва, Российская Федерация, 119019, e-mail: [info@granit-concern.ru](mailto:info@granit-concern.ru)

**Турканов Игорь Федорович**, руководитель, Научный центр ОАО «Концерн «ГРАНИТ», б-р Гоголевский, д. 31, стр. 2, г. Москва, Российская Федерация, 119019, e-mail: [info@granit-concern.ru](mailto:info@granit-concern.ru)

**Галкина Екатерина Анатольевна**, специалист, Научный центр ОАО «Концерн «ГРАНИТ», б-р Гоголевский, д. 31, стр. 2, г. Москва, Российская Федерация, 119019, e-mail: [info@granit-concern.ru](mailto:info@granit-concern.ru),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3824-2577>

**Грязнов Валерий Георгиевич**, кандидат тех. наук, зам. руководителя, Научный центр ОАО «Концерн «ГРАНИТ», б-р Гоголевский, д. 31, стр. 2, г. Москва, Российская Федерация, 119019, e-mail: [info@granit-concern.ru](mailto:info@granit-concern.ru),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5751-6815>

#### *Information about the authors*

**Vladimir G. Zainullin**, DSc in Biological Science, professor, leading researcher, A. V. Zhuravsky Institute of Agro-Biotechnologies of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Rucheynaya, 27, Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation, 167023, e-mail: [nipti@bk.ru](mailto:nipti@bk.ru),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9378-1170>

**Aleksandra N. Pozhirickaya**, junior researcher, A. V. Zhuravsky Institute of Agro-Biotechnologies of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Rucheynaya, 27, Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation, 167023, e-mail: [nipti@bk.ru](mailto:nipti@bk.ru), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8869-4963>

✉ **Antonina M. Turlakova**, junior researcher, A. V. Zhuravsky Institute of Agro-Biotechnologies of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Rucheynaya, 27, Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation, 167023, e-mail: [nipti@bk.ru](mailto:nipti@bk.ru),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8038-6534>, e-mail: [turlakova100krap@mail.ru](mailto:turlakova100krap@mail.ru)

**Alexander V. Partala**, Specialist of the Scientific Department, Scientific Center of JSC Concern GRANIT, Gogolevsky b-r, 31, building 2, Moscow, Russian Federation, 119019, e-mail: [info@granit-concern.ru](mailto:info@granit-concern.ru)

**Oleg V. Ovchinnikov**, Member of the Scientific Department, Chairman of the Board of Directors, Scientific Center of JSC Concern GRANIT, Gogolevsky b.31, building 2, Moscow, Russian Federation, 119019, e-mail: [info@granit-concern.ru](mailto:info@granit-concern.ru)

**Elena V. Bondarchuk**, Vice-President, Scientific Center of JSC Concern GRANIT, Gogolevsky Street, 31, building 2, Moscow, Russian Federation, 119019, e-mail: [info@granit-concern.ru](mailto:info@granit-concern.ru)

**Igor F. Turkanov**, Head, Scientific Center of JSC Concern GRANIT, Gogolevsky b., 31, building 2, Moscow, Russian Federation, 119019, e-mail: [info@granit-concern.ru](mailto:info@granit-concern.ru)

**Ekaterina A. Galkina**, Specialist, Scientific Center of JSC Concern GRANIT, Gogolevsky b-r, 31, building 2, Moscow, Russian Federation, 119019, e-mail: [info@granit-concern.ru](mailto:info@granit-concern.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3824-2577>

**Valery G. Gryaznov**, PhD in Engineering, Deputy Head, Scientific Center of JSC Concern GRANIT, Gogolevsky b., 31, building 2, Moscow, Russian Federation, 119019, e-mail: [info@granit-concern.ru](mailto:info@granit-concern.ru),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5751-6815>

✉ – Для контактов / Corresponding author