

<https://doi.org/10.31279/2949-4796-2026-16-2-43-56>

Новый подход к предпосевной обработке семян: влияние низкотемпературного и микроволнового воздействия на урожайность озимой пшеницы

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Олег Николаевич Бахчевников
E-mail: oleg-b@list.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Пахомов В.И., Брагинец А.В., Бахчевников О.Н., Максак Д.А. Новый подход к предпосевной обработке семян: влияние низкотемпературного и микроволнового воздействия на урожайность озимой пшеницы. *Аграрный вестник Северного Кавказа*. 2026;16(2):43-56. <https://doi.org/10.31279/2949-4796-2026-16-2-43-56> EDN GUIABP

ПОСТУПИЛА: 10.03.2026

ДОРАБОТАНА: 19.05.2026

ПРИНЯТА: 28.05.2026

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

COPYRIGHT: © 2026 Пахомов В.И., Брагинец А.В., Бахчевников О.Н., Максак Д.А.



В.И. Пахомов , А.В. Брагинец , О.Н. Бахчевников ✉,
Д.А. Максак
Аграрный научный центр «Донской», Зерноград, Россия

АННОТАЦИЯ

ВВЕДЕНИЕ. Повышение урожайности сельскохозяйственных культур при сохранении экологического равновесия во многом определяется совершенствованием методов предпосевной обработки семян, что делает эту область исследований особенно значимой. Особый интерес представляет совершенствование метода предпосевной обработки семян СВЧ-излучением с целью раскрытия его полного потенциала.

ЦЕЛЬ. Определить влияние предпосевной обработки семян озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) последовательным воздействием охлаждения до -70°C и микроволнового излучения на ее урожайность в условиях полевого опыта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Исследования проводили в 2023–2025 гг. в Ростовской области, Россия. Применяли кратковременное охлаждение семян до -70°C с последующим нагревом микроволновым излучением частотой 2450 МГц до температуры 40, 50 и 60°C . Результаты сравнивали с вариантами обработки только СВЧ-нагревом до 40, 50 и 60°C и протравливанием фунгицидом (контроль).

РЕЗУЛЬТАТЫ. Комбинированное воздействие СВЧ и холода обеспечивает повышение биологической урожайности пшеницы на 9,8–19,0 % по сравнению с контролем (протравливание). Максимальная урожайность 9,62 т/га была достигнута при нагреве семян до 50°C после замораживания. Применение СВЧ-нагрева без предварительной заморозки было неэффективным. Положительный эффект достигнут за счет увеличения количества продуктивных стеблей (на 9,6–14,3 %), продуктивной кустистости (на 3,7–21,7 %) и массы чистого зерна (на 9,6–15,2 %).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Последовательное действие на семена холода и СВЧ-излучения имеет синергетический характер: охлаждение активирует синтез цитокининов, а микроволновое излучение стимулирует обмен веществ. Полученные результаты подтверждают перспективность физических методов как экологически безопасной альтернативы химическим способам предпосевной обработки семян.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: озимая пшеница, семена, предпосевная обработка семян, кратковременное охлаждение, СВЧ-излучение, эустресс, урожайность, структура урожайности

<https://doi.org/10.31279/2949-4796-2026-16-2-43-56>

New approach to pre-sowing seed treatment: the effect of low temperature and microwave exposure on the yield of winter wheat

CORRESPONDENCE:

Oleg N. Bakhchevnikov

E-mail: oleg-b@list.ru

FOR CITATION:

Pakhomov V.I., Braginets A.V., Bakhchevnikov O.N., Maksak D.A. New approach to pre-sowing seed treatment: the effect of low temperature and microwave exposure on the yield of winter wheat. *Agrarian Bulletin of the North Caucasus*. 2026;16(2):43-56. (In Russ.) <https://doi.org/10.31279/2949-4796-2026-16-2-43-56>

RECEIVED: 10.03.2026

REVISED: 19.05.2026

ACCEPTED: 28.05.2026

DECLARATION OF COMPETING INTEREST:

none declared.

COPYRIGHT: © 2026 Pakhomov V.I., Braginets A.V., Bakhchevnikov O.N., Maksak D.A.



Viktor I. Pakhomov , Andrey V. Braginets ,
Oleg N. Bakhchevnikov ✉, Dmitriy A. Maksak

Agricultural Research Centre Donskoy, Zernograd, Russia

ABSTRACT

INTRODUCTION. Increasing crop yields while maintaining ecological balance is largely determined by improving pre-sowing seed treatment methods, which makes this area of research particularly significant. Of special interest is the improvement of the method using microwave radiation in order to realize its full potential.

AIM. To determine the effect of pre-sowing treatment of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) seeds by sequential exposure to cooling to -70°C and microwave radiation on its yield under field experiment conditions.

MATERIALS AND METHODS. The research was conducted in 2023–2025 in Rostov Oblast, Russia. Short-term cooling of seeds to -70°C was applied, followed by heating with microwave radiation at a frequency of 2450 MHz to temperatures of 40, 50, and 60°C . The results were compared with treatments involving only microwave heating to 40, 50, and 60°C and with seed treatment (control).

RESULTS. Combined microwave and cold exposure provides an increase in biological wheat yield by 9.8–19.0% compared to the control (fungicide treatment). The maximum yield of 9.62 t/ha was achieved when seeds were heated to 50°C after freezing. The use of microwave heating without prior freezing was ineffective. The positive effect was achieved due to an increase in the number of productive tillers (by 9.6–14.3%), productive tillering capacity (by 3.7–21.7%), and clean grain weight (by 9.6–15.2%).

CONCLUSION. Sequential exposure of seeds to cold and microwave radiation is synergistic in nature: cooling activates cytokinin synthesis, while microwave radiation stimulates metabolism. The obtained results confirm the promise of physical methods as an environmentally safe alternative to chemical methods of pre-sowing seed treatment.

KEYWORDS: winter wheat, seeds, pre-sowing seed treatment, short-term freezing, microwave radiation, eustress, yield, yield structure

ВВЕДЕНИЕ

В современной аграрной науке разработка и совершенствование способов предпосевной подготовки семян является актуальным направлением исследований, нацеленным на улучшение их всхожести и, как следствие, на рост урожайности сельскохозяйственных культур [1]. Качество предпосевной подготовки семян определяет скорость и равномерность появления всходов, что особенно важно при возделывании культур в зонах рискованного земледелия. При этом все больше внимания уделяется экологически безопасным нехимическим технологиям, которые обеспечивают стимулирование прорастания семян [2]. Такая тенденция обусловлена тем, что широкое применение химических протравителей, несмотря на их доказанную эффективность против патогенов, имеет ряд существенных недостатков. К ним относятся накопление токсичных соединений в почве, формирование резистентных штаммов фитопатогенов, а также риск присутствия остаточных количеств ядовитых веществ в конечной сельскохозяйственной продукции [3].

К числу перспективных способов обработки семян относят воздействие различными физическими факторами, которые позволяют активировать биохимические процессы в семени без применения химикатов, что соответствует современным тенденциям устойчивого земледелия [4].

Одним из перспективных физических методов обработки семян считается использование микроволнового (СВЧ) излучения [5]. Было выявлено, что микроволновое излучение способствует активации физических и биохимических процессов в клетках растений, что помогает прервать состояние покоя семени и запустить процесс прорастания [6]. Под действием излучения происходит ускорение обменных реакций, повышение активности ферментов, участвующих в гидролизе запасных питательных веществ, и усиление дыхания [7], что обеспечивает более интенсивное развитие зародыша и улучшение стартовых показателей роста.

Применение СВЧ-излучения, как и других физических методов, для предпосевной обработки семян предотвращает поступление и накопление в почве токсичных веществ, входящих в состав протравителей.

В большинстве экспериментов обработка семян СВЧ-излучением положительно сказывалась на росте проростков и увеличении биомассы у разных ви-

дов растений [8; 9]. Тем не менее воздействие микроволнового излучения не во всех случаях приводило к достоверному улучшению прорастания семян. Установлено, что для каждого вида растений существует пороговый уровень интенсивности СВЧ-излучения и длительности его воздействия, превышение которого негативно сказывается на всхожести семян и жизнеспособности ростков [10].

Помимо прямой стимуляции прорастания семян, СВЧ-излучение в умеренных дозах выступает как экологический фактор, который может вызывать у растений реакции, аналогичные ответу на абиогенное стрессовое воздействие [2; 6]. Эта концепция, известная как гормезис, предполагает, что слабый стресс мобилизует защитные системы организма [11]. В некоторых научных работах отмечается, что предпосевная обработка семян микроволновым излучением в последующем повышает устойчивость растений к абиотическим стрессам [12]. Речь идет о таких факторах, как засуха, засоление почвы, а также резкие перепады температур. «Закалка» семян на начальном этапе формирует у растения своего рода «память» о стрессе, что позволяет ему в дальнейшем более эффективно и быстро реагировать на реальные угрозы в полевых условиях, более легко и быстро активируя защитные механизмы [13]. Данный факт позволяет рассматривать СВЧ-излучение как эустрессор, который способствует адаптации растений к неблагоприятным условиям окружающей среды. Таким образом, обработка перед посевом семян сельскохозяйственных культур, в частности пшеницы, микроволновым излучением потенциально может увеличить их урожайность.

Однако полевые опыты, проведенные ранее, продемонстрировали, что эффективность использования СВЧ-излучения в качестве метода обработки семян для повышения урожайности зерновых культур, в частности озимой пшеницы, уступает другим способам, таким как обработка ультрафиолетовым излучением и газообразным озоном. В полевых исследованиях, проведенных авторами настоящей статьи, также было показано, что урожайность ярового ячменя после СВЧ-обработки его семян достоверно не отличалась от контрольной группы, где применялось химическое протравливание [14]. Даже подбор оптимальных параметров обработки СВЧ способен лишь незначительно увеличить ее эффективность. Так, в результате обработки СВЧ-излучением с оптимальными параметрами семян гороха была получена прибавка урожайности

+14 % к контролю, тогда как действие УФ и озона дало прибавку +27 и +17 % соответственно [15].

Таким образом, существует необходимость в усовершенствовании потенциально перспективного способа предпосевной обработки семян СВЧ-излучением для увеличения его эффективности, выражающейся в повышении урожайности.

По нашему предположению, основанному на анализе ранее опубликованных работ, радикально повысить эффективность предпосевной обработки семян СВЧ-излучением для увеличения урожайности возможно комбинированием этого воздействия с другим способом обработки, являющимся эффективным эустрессором [2; 16].

Таким потенциальным способом обработки семян является воздействие холода — кратковременное замораживание [17]. Отрицательные температуры вызывают физический стресс у патогенных микроорганизмов, не нанося непоправимого вреда семенам, поскольку многие виды растений хорошо переносят условия, подобные криоконсервации [18]. По имеющейся информации, холодовой стресс индуцирует важные транскрипционные изменения, которые подготавливают клетки семян к быстрому росту [19]. При этом активируются гены, связанные с холодовым ответом и быстрым метаболизмом. Более того, цитокинины, также являющиеся антагонистами абсцизовой кислоты, стимулируют митотическое деление клеток [20]. Их активация в процессе охлаждения обеспечивает немедленный и сильный старт роста корня и побега сразу после посева семени в почву.

Так как в процессе действия СВЧ-излучения происходит нагрев обрабатываемых материалов [21], то обработка микроволновым излучением будет включать необходимый этап размораживания семян в сочетании со стимулирующим и дезинфицирующим действием и ускорять его осуществление.

Цель исследования — определить влияние предпосевной обработки семян озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) последовательным воздействием охлаждения до -70°C и микроволнового излучения на ее урожайность в условиях полевого опыта.

Задачи исследования: оценить изменение структуры урожайности озимой пшеницы под влиянием различных вариантов предпосевной обработки ее семян; установить оптимальные параметры комбинированного воздействия холода и микровол-

нового излучения, обеспечивающие наибольшую урожайность и положительное изменение структурных элементов урожая.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект и локация исследования

Полевой опыт выполняли в 2023–2024 и 2024–2025 гг. на территории зерноградского района, расположенного на юге Ростовской области, Россия. Объектом исследований являлась мягкая озимая пшеница (*Triticum aestivum* L.) сорта Амбар [22]. Данный сорт включен в Государственный реестр селекционных достижений Российской Федерации в 2022 г., оригинатор — ФГБНУ «АНЦ «Донской».

Почвенные условия

Почва на опытных участках была классифицирована сотрудниками «АНЦ «Донской» на основе полевых и лабораторных анализов в 2017 г. как «чернозем обыкновенный глубокий карбонатный тяжелосуглинистый» (Haplic Chernozem (Calcaric, Loamic, Pachic) согласно Международной реферативной базе по почвенным ресурсам WRB 2014 (update 2015)). Химический состав почвы свидетельствует о среднем сбалансированном уровне обеспеченности элементами питания и нейтральной реакции среды: содержание гумуса — 3,3 % (по Тюрину), общего азота — 28,3 мг/кг (по ГОСТ Р 58596–2019), подвижного фосфора — 20–25 мг/кг (по Кирсанову), обменного калия — 300–350 мг/кг (по Масловой), pH солевой вытяжки — 7,1 (по ГОСТ 26483–85).

Погодные условия

В период вегетации 2023–2024 гг. в осенний период наблюдался дефицит влаги в пахотном слое почвы. Зимой осадки были больше нормы. Весной возобновление вегетации произошло в условиях дефицита осадков (на 10–15 % ниже нормы), что замедлило кущение растений. Температура воздуха в этот период была немного выше многолетней нормы.

В 2024–2025 гг. вегетационный период характеризовался засушливыми условиями осенью (дефицит 30–40 % от нормы), нормальными зимой и значительным дефицитом осадков в апреле – июне (50–60 % ниже нормы). Температура воздуха в апреле – июне была существенно выше нормы. Такие условия привели к почвенной засухе в июне 2025 г.

Схема опыта

Полевой опыт был поставлен в четырехкратной повторности с систематическим размещением вариантов на опытном участке [23]. Однофакторный полевой опыт заложили в четырехкратной повторности. Общее количество опытных делянок составило 28 (7 вариантов × 4 повторности), каждая из которых имела размеры 30×1,2 м (36 м²). Делянки располагались параллельно, с разделительной защитной полосой между ними в 0,4 м.

Методы и оборудование для обработки семян

Предпосевная подготовка семян озимой пшеницы была осуществлена за сутки до начала посевных работ, при этом семена не увлажняли.

Семена влажностью 10–14 % вначале помещали в лабораторный морозильник «Bios Midea BD-86L108» (рисунок 1а) и охлаждали до температуры –70 °С. Температуру семян в камере контролировали с помощью термодары.

Сразу после достижения этой температуры семена вынимали из морозильной камеры и помещали в экспериментальную СВЧ-установку (рисунок 1б), где обрабатывали излучением частотой 2450 МГц и мощностью 700 Вт, в результате чего семена нагревались до достижения температуры 40, 50

и 60 °С (на выходе из зоны действия магнетрона). Продолжительность воздействия СВЧ-излучения на семена, необходимая для достижения указанных температур, была определена в ходе предварительных экспериментов.

Часть семян пшеницы не подвергали кратковременному охлаждению, а нагревали в СВЧ-установке от комнатной температуры до 40, 50 и 60 °С.

Как контроль для сравнения использовали данные по структуре биологической урожайности озимой пшеницы, семена которой обрабатывали фунгицидом в поточном протравителе «Norogard-Bel R-1». Для этого использовали фунгицидный препарат «Скарлет МЭ», содержащий в качестве действующих веществ тебуконазол 60 г/л и имазалил 100 г/л. Режим протравливания: доза препарата 0,4 л/т, расход рабочей жидкости 10 л/т.

Методика посева и выращивания растений

Посев озимой пшеницы произвели на опытном участке, где предшественником был черный пар. Для сева пшеницы использовали селекционную сеялку «СС-11 Альфа». Норма высева была установлена на уровне 180 кг/га, что эквивалентно 4,1 млн всхожих семян на гектар. На каждой опытной делянке высевали семена пшеницы, подвергнутые воздействию только одного из изучаемых режимов обработки.



а



б

Рисунок 1

Технические средства для предпосевной обработки семян пшеницы СВЧ и холодом: а — лабораторный морозильник «Bios Midea BD-86L108»; б — экспериментальная установка СВЧ

Figure 1

Hardware for pre-sowing treatment of wheat seeds with microwave radiation and cold: а — Bios Midea BD-86L108 laboratory freezer; б — experimental microwave radiation unit

Одновременно с посевом семян пшеницы в почву внесли минеральные удобрения (аммиачная селитра) из расчета 80 кг/га. В продолжение вегетационного периода пшеницы провели две подкормки растений с использованием аммиачной селитры (доза по 60 кг/га каждая): первая на стадии весеннего кущения, вторая была выполнена в фазе выхода в трубку.

Агротехника на опытном участке соответствовала рекомендованной для зоны: основная обработка почвы включала отвальную вспашку на 20–22 см, предпосевная культивация — на 6–8 см. Против сорняков в фазу кущения применяли гербицид Пума Супер (доза 0,4 л/га), защита от вредителей и болезней в период вегетации не проводилась для оценки фунгицидного эффекта изучаемых физических факторов.

Методы исследований

Биологическую урожайность и ее структурные элементы определяли после того, как зерно достигало фазы полной спелости¹. Биологическую урожайность определяли путем отбора снопов с площадок 1 м² перед уборкой. Комбайн «Sampo-Rozenlew SR2010» использовался для сплошной уборки делянок. Данные структурного анализа снопов приняты за основу как наиболее точные для малых делянок. Полученное в результате структурного анализа значение биологической урожайности пересчитывали на стандартную влажность 14 %.

Все числовые значения показателей биологической урожайности и ее структуры, приведенные в статье, являются средними за два года. Для подтверждения статистической значимости полученных данных полевого опыта по урожайности вычисляли наименьшую существенную разность (НСР) между выборками [23; 24]. Расчет НСР выполнили при 5 % уровне значимости (НСР₀₅). Для определения наименьшей существенной разности между средними показателями урожайности пшеницы за два года применяли метод обобщенной НСР [24]. Метод обобщенной НСР, впервые разработанный В. И. Короневским, предусматривает вычисление обобщенной наименьшей существенной разности для средних данных по ряду лет по сумме возведенных в квадрат величин НСР за каждый год, деленной на количество лет эксперимента, и извлечение из частного от деления квадратного корня [25].

При обработке результатов опытов сравнивали биологическую урожайность и ее структуру с делянок,

на которых были высеяны семена, подвергшиеся последовательному действию холода и СВЧ, с результатами делянок, где были высеяны семена, обработанные только СВЧ-излучением. Эти же результаты сравнивали с контролем (протравливание семян).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Фенологические наблюдения

Наблюдения за опытными посевами озимой пшеницы на делянках, выполняемые в продолжение всего вегетационного периода, показали, что предварительно обработанные семена дали хорошие всходы, а растения демонстрировали нормальное развитие, что в конце периода привело к получению хорошего урожая (рисунок 2).

Фенологические наблюдения показали, что длительность межфазных периодов «всходы — кущение», «кущение — выход в трубку», «выход в трубку — колошение» и «колошение — полная спелость» статистически значимо не различалась между вариантами опыта и составляла в среднем 15, 31, 28 и 44 дней соответственно при общей средней продолжительности вегетационного периода 277 дней.

Урожайность

В таблице 1 и на рисунке 3 приведены сравнительные данные по биологической урожайности озимой пшеницы, семена которой обрабатывали в различных комбинациях СВЧ-излучением и кратковременным действием холода.

Анализ экспериментальных данных позволил установить, что предпосевная обработка семян, включающая последовательное применение кратковременного охлаждения и СВЧ-излучения, приводит к статистически достоверному росту биологической урожайности озимой пшеницы на 9,8–19,0 % в сравнении с традиционным методом протравливания. Наивысший показатель урожайности, составивший 9,62 т/га (на 19,0 % выше контроля), был зафиксирован при последовательном воздействии на семена холодом (–70 °С) и последующим СВЧ-нагревом до температуры 50 °С. Режимы с охлаждением до –70 °С и последующим нагревом до 40 °С и 60 °С были менее результативными, обеспечив увеличение урожайности только на 10,3 и 9,8 % соответственно.

¹ Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Вып. 1. М. : ФГБУ «Госсорткомиссия», 2019. 329.

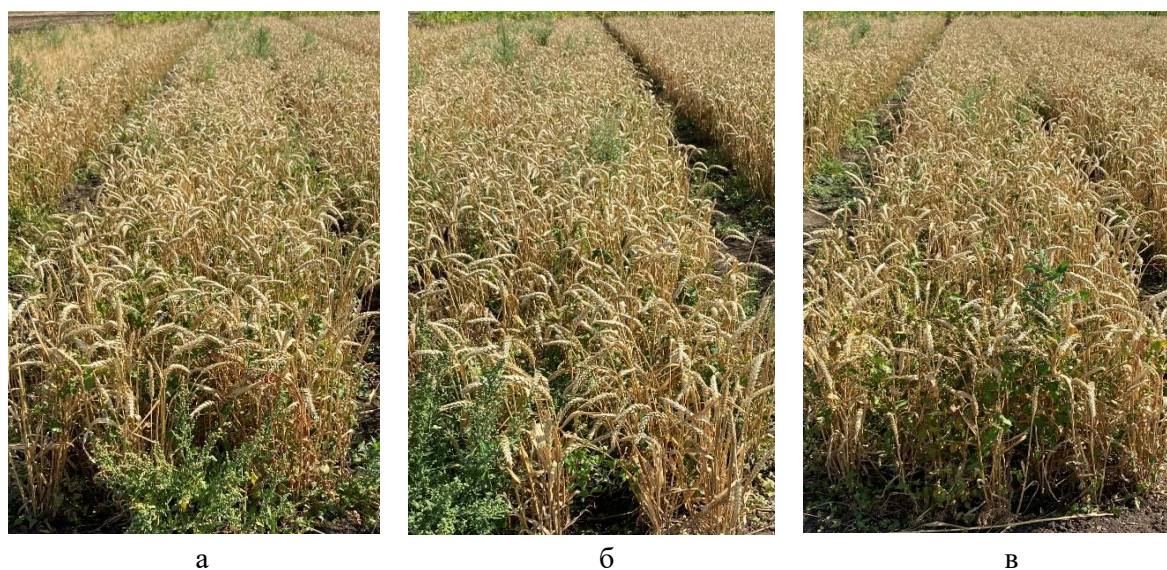


Рисунок 2

Состояние опытных посевов озимой пшеницы (в фазе полной спелости), семена которой были обработаны: а — контроль (протравливание); б — нагрев СВЧ до 50 °С; в — охлаждение до -70 °С, затем нагрев СВЧ до 50 °С

Figure 2

Condition of experimental winter wheat crops (in the full ripeness phase), the seeds of which were treated: a — control (fungicide treatment); b — microwave heating to 50°C; c — freezing to -70°C, then microwave heating to 50°C

Таблица 1

Изменение биологической урожайности озимой пшеницы в зависимости от примененного способа предпосевной обработки семян СВЧ и холодом

Table 1

Change in the biological yield of winter wheat depending on the method of seeds pre-sowing treatment with microwave radiation and cold

Вид обработки	Урожайность, т/га
Контроль (протравливание фунгицидом)	8,08
СВЧ нагрев до 40 °С	7,63
Заморозка до -70 °С, СВЧ нагрев до 40 °С	8,92*
СВЧ нагрев до 50 °С	7,31*
Заморозка до -70 °С, СВЧ нагрев до 50 °С	9,62*
СВЧ нагрев до 60 °С	9,00*
Заморозка до -70 °С, СВЧ нагрев до 60 °С	8,87*
НСР ₀₅	0,48

Примечание: * достоверно при $p \leq 0,05$

Note: * significant at $p \leq 0.05$

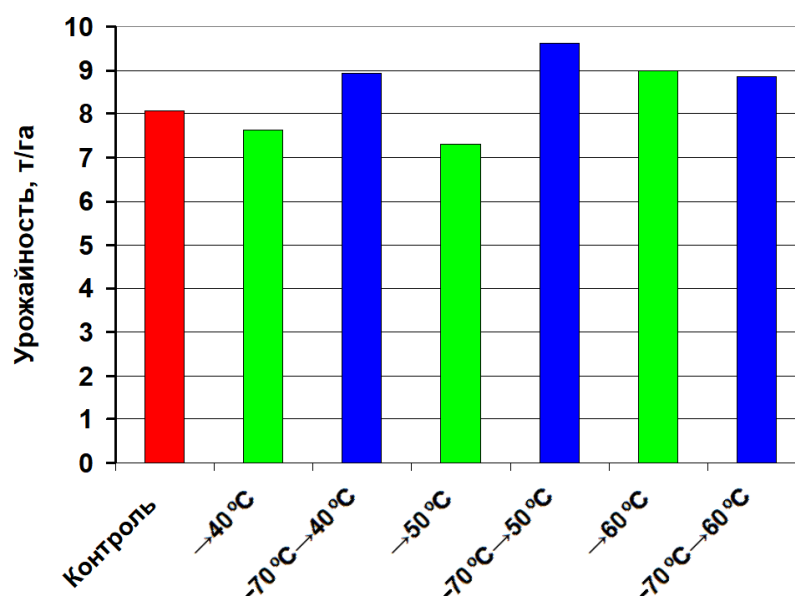


Рисунок 3

Биологическая урожайность озимой пшеницы в зависимости от примененного режима предпосевной обработки семян СВЧ-излучением и холодом

Figure 3

Biological yield of winter wheat depending on the method of pre-sowing seeds treatment with microwave radiation and cold

Обработка семян СВЧ-излучением без предварительного охлаждения в большинстве вариантов оказалась неэффективной, так как биологическая урожайность для таких делянок была достоверно меньше контрольных значений. Лишь для варианта СВЧ-обработки без заморозки с нагревом до 60 °С биологическая урожайность составила 9,0 т/га, что на 11,4 % выше контроля.

В целом, обработка семян пшеницы СВЧ после предварительной заморозки оказалась более эффективной, чем просто обработка СВЧ-излучением. Также следует отметить закономерность, согласно которой эффективность обработки семян холодом (–70 °С) и СВЧ имеет максимум при режиме нагрева до 50 °С, тогда как уменьшение или увеличение температуры нагрева от этого значения снижает урожайность пшеницы.

Сравнение данных по урожайности для режимов обработки семян СВЧ с предварительным охлаждением и без него показывает, что заморозка семян в большинстве случаев увеличивает урожайность пшеницы. Так, при использовании режима «охлаждение до –70 °С — нагрев до 40 °С» урожайность была на 16,9 % выше, чем для режима «нагрев до 40 °С». При

использовании режима «охлаждение до –70 °С — нагрев до 50 °С» урожайность была на 31,6 % выше, чем для режима «нагрев до 50 °С». И лишь для режима обработки «охлаждение до –70 °С — нагрев до 60 °С» величина урожайности достоверно не отличалась от значения для режима «нагрев до 60 °С».

Структура урожайности

Для понимания того, каким образом обработка семян СВЧ-излучением и холодом влияет на урожайность пшеницы, необходимо изучить структуру ее биологической урожайности. Ниже приведены данные по структуре биологической урожайности озимой пшеницы, семена которой были предварительно подвергнуты обработке холодом и СВЧ-излучением, в сравнении с контролем (таблица 2).

Дальнейший анализ экспериментальных данных (таблица 2) показал, что рост биологической урожайности пшеницы после обработки семян СВЧ-излучением и холодом и СВЧ был, в частности, обусловлен увеличением количества продуктивных стеблей на единицу площади (густоты продуктивного стеблестоя) (рисунок 4) и, как следствие, повышением значений продуктивной кустистости (рисунок 5).

Таблица 2

Структура биологической урожайности озимой пшеницы, семена которой были предварительно обработаны перед посевом СВЧ-излучением и холодом

Figure 2

Structure of the biological yield of winter wheat, the seeds of which were pre-treated with microwave radiation and cold before sowing

Показатель	Режим обработки							НСР ₀₅
	Контроль (фунгицид)	20→ 40 °С	–70→ 40 °С	20→ 50 °С	–70→ 50 °С	20→ 60 °С	–70→ 60 °С	
Количество растений на 1 м ² , шт.	89	94	98*	100*	87	101*	85	5
Количество продуктивных стеблей на 1 м ² , шт.	407	377	465*	412	458*	489*	446*	34
Продуктивная кустистость, шт/растение	4,57	4,01*	4,74	4,12*	5,26*	4,84*	5,25*	0,19
Масса чистого зерна с 1 м ² , г	767,8	689,4*	846,8*	728,4*	885,4*	867,4*	841,9*	42,1
Масса соломы с 1 м ² , г	1337,2	1170,1*	1578,2*	1356,6	1124,6*	1602,6*	1443,1*	94,9
Соотношение солома / зерно	1,75	1,73	1,88*	1,87*	1,30*	1,87*	1,73	0,12
Масса колоса, г	1,92	1,94	1,85*	1,70*	2,02*	1,77*	1,91	0,07
Количество зерен в колосе, шт.	43	47*	45*	46*	49*	45*	44	2
Масса 1000 зерен, г	44,26	39,48*	40,36*	38,61*	40,43*	39,61*	43,18	3,90
Биологическая урожайность, т/га	8,08	7,63	8,92*	7,31*	9,62*	9,00*	8,87*	0,48

Примечание: * достоверно при $p \leq 0,05$

Note: * significant at $p \leq 0.05$

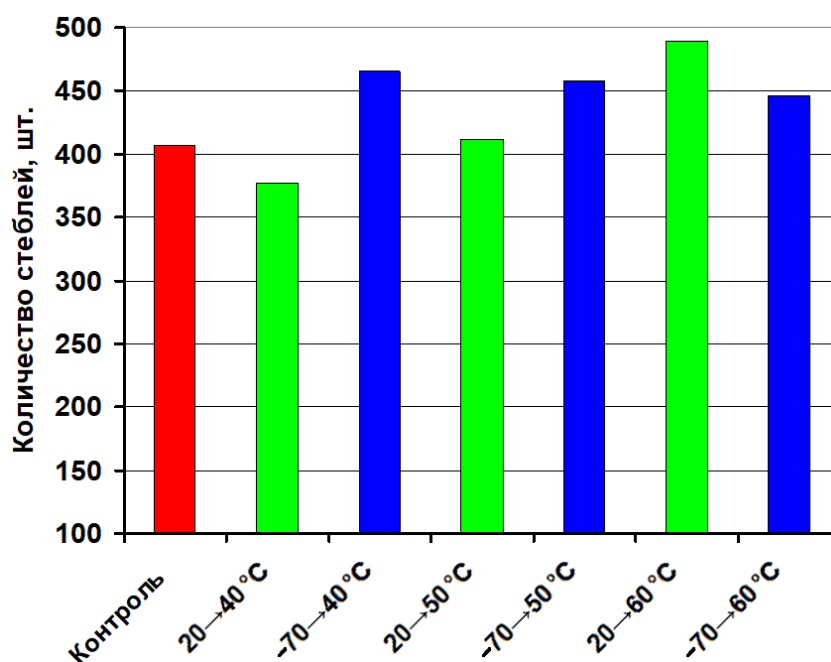


Рисунок 4

Влияние различных режимов предпосевной обработки семян озимой пшеницы СВЧ и холодом на количество продуктивных стеблей на единицу площади (густоту продуктивного стеблестоя)

Figure 4

Effect of different methods of pre-sowing treatment of winter wheat seeds with microwave radiation and cold on the number of productive stems per unit area (density of fertile tillers)

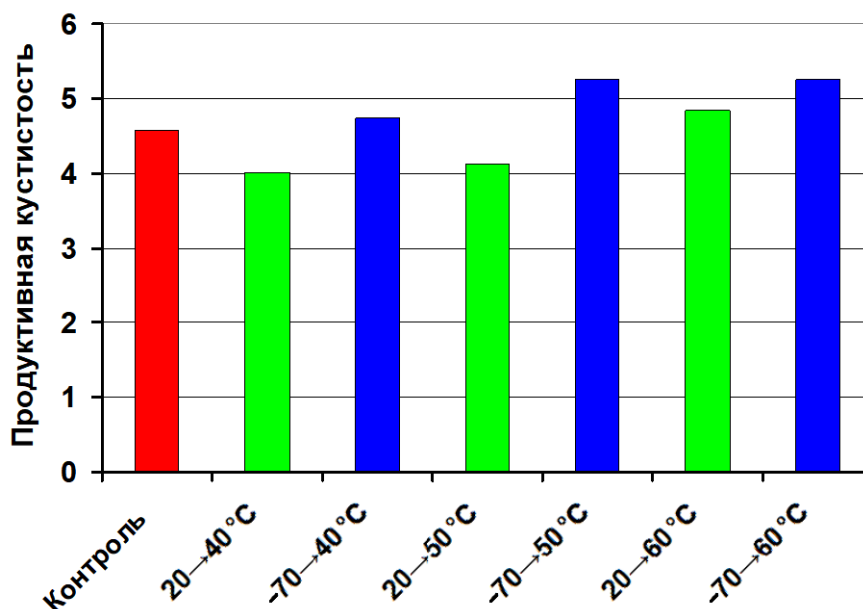


Рисунок 5

Влияние различных режимов предпосевной обработки семян озимой пшеницы СВЧ и холодом на продуктивную кустистость

Figure 5

Effect of different pre-sowing treatment regimes for winter wheat seeds with microwave radiation and cold on productive tillering

Сравнение данных для режимов обработки семян СВЧ с предварительным охлаждением и без него показывает, что заморозка семян однозначно увеличивает количество продуктивных стеблей пшеницы по сравнению с контролем в диапазоне 9,6–14,3 %. При использовании же режимов обработки семян СВЧ без охлаждения количество стеблей достоверно превысило контроль лишь для режима «нагрев до 60 °C».

Аналогично обработка семян СВЧ с предварительным охлаждением на всех режимах увеличивает значение продуктивной кустистости по сравнению с контролем на 3,7–21,7 %. При использовании режимов обработки семян СВЧ без охлаждения продуктивная кустистость достоверно превысила контроль лишь для режима «нагрев до 60 °C».

Увеличение продуктивной кустистости пшеницы в результате предпосевной обработки семян СВЧ и холодом приводит к увеличению значений количественного показателя «Масса чистого зерна с 1 м²». Установлено, что обработка семян пшеницы СВЧ-излучением с предварительным кратковременным охлаждением до –70 °C на всех примененных режимах увеличивает значения массы чистого зерна с делек на 9,6–15,2 % по сравнению с контролем. Максимальное значение для этого количественного признака было достигнуто при использовании режима «охлаждение до –70 °C — нагрев до 50 °C». При использовании режимов обработки семян СВЧ без охлаждения масса чистого зерна достоверно превысила контроль лишь для режима «нагрев до 60 °C».

Из других количественных признаков структуры урожайности пшеницы следует отметить изменения значений показателя «количество зерен в колосе» под действием СВЧ-обработки. Обработка семян только СВЧ-излучением в большинстве случаев значительно увеличивает количество зерен в колосе. После их нагрева СВЧ без заморозки значение этого показателя в среднем составило 46 шт. против 43 шт. у контроля (+7,0 %). Диапазон значений показателя «количество зерен в колосе» составил 45–47 шт., причем его значение уменьшалось по мере увеличения температуры СВЧ-обработки.

Среднее количество зерен в колосе у растений пшеницы, выращенных из семян с обработкой холодом и СВЧ-излучением, также составляет 46 шт., но в данном случае наблюдается больший разброс данных — от 44 до 49 шт. при разных режимах.

Но в то же время увеличение количества зерен в колосе не сопровождалось существенным увеличением массы колоса. Для большинства вариантов она не превысила значение контроля. Лишь для делек с режимом обработки «охлаждение до –70 °C — нагрев до 50 °C» масса колоса была на 5,2 % больше контроля.

Увеличение количества зерен в колосе при отсутствии одновременного повышения массы колоса привело к уменьшению значений массы 1000 зерен пшеницы по сравнению с контрольным вариантом для всех изученных режимов обработки семян, как только действием СВЧ, так и СВЧ и холодом.

Таким образом, предварительное кратковременное охлаждение семян озимой пшеницы до –70 °C повышает эффективность предпосевной обработки СВЧ-излучением, критерием чего служит увеличение биологической урожайности.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате обработки экспериментальных данных двухлетнего полевого опыта было достоверно установлено, что применение комбинированной предпосевной обработки семян озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) последовательным воздействием холода и СВЧ-излучения является эффективным. Установлено, что применение такой обработки способствует достоверному увеличению биологической урожайности по сравнению с традиционным способом протравливания семян фунгицидом. Оптимальным режимом воздействия является кратковременное охлаждение семян до –70 °C с последующим нагревом в поле микроволнового излучения частотой 2450 МГц до температуры 50 °C. Другие температурные режимы нагрева (до 40 °C и 60 °C) в сочетании с заморозкой также продемонстрировали положительную динамику, увеличив урожайность. При этом использование только СВЧ-нагрева без предварительного замораживания в большинстве случаев не обеспечивало роста биологической урожайности, а при температуре нагрева семян 40 и 50 °C даже приводило к ее снижению относительно контроля.

Положительный эффект комбинированного воздействия холода и СВЧ проявляется в улучшении структурных элементов урожайности — увеличении количества продуктивных стеблей (густоты продуктивного стеблестоя), повышении кустисто-

сти и массы чистого зерна на единицу площади делянок. Для всех режимов обработки СВЧ, включавших предварительное охлаждение семян, было выявлено достоверное увеличение значений этих показателей.

Установленные зависимости указывают на синергетический характер взаимодействия холодогового и микроволнового факторов. Объяснением эффективности предложенного метода обработки семян холодом и СВЧ предположительно является положительное действие холодогового эустресса, ускоряющего и усиливающего прорастание семян и дальнейший рост растений. Предположительно предварительная заморозка семян может активировать биохимические процессы, связанные с холодовым ответом растений, включая синтез цитокининов и ускорение митотического деления клеток, что требует дальнейшего изучения. Последующее воздействие СВЧ-излучения не только обеспечивает размораживание семян, но и стимулирует обменные процессы, повышая энергетический потенциал прорастания. Таким образом, комбинированная обработка семян формирует у растений выраженную стрессовую устойчивость, что способствует более активному кущению и формированию большего количества продуктивных побегов.

Полученные результаты демонстрируют перспективность интеграции действия различных физических факторов в технологии предпосевной обработки семян. Комбинирование кратковременного охлаждения с воздействием СВЧ представляет собой безопасную альтернативу химическим методам стимуляции роста и обеззараживания посевного материала. Следует подчеркнуть, что эффективность метода определяется строгим соблюдением

режимов и параметров воздействия, так как отклонение температуры нагрева от оптимальных значений снижает урожайность растений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты двухлетнего полевого опыта (2023–2025 гг.) достоверно подтвердили, что комбинированная предпосевная обработка семян озимой пшеницы охлаждением до -70°C и последующим микроволновым нагревом повышает биологическую урожайность на 9,8–19,0 % по сравнению с традиционным химическим протравливанием. Наивысший показатель урожайности 9,62 т/га зафиксирован при режиме замораживания с последующим СВЧ-нагревом до 50°C , тогда как СВЧ-обработка без предварительного охлаждения при температурах 40 и 50°C приводила к статистически значимому снижению урожая относительно контроля. Прирост продуктивности обеспечивался достоверным увеличением густоты продуктивного стеблестоя на 9,6–14,3, продуктивной кустистости на 3,7–21,7 и массы чистого зерна с 1 м² на 9,6–15,2 %. Выявленные количественные изменения структурных элементов урожая свидетельствуют о том, что предварительный холодовой стресс существенно оптимизирует метаболическую активность семян для последующей СВЧ-стимуляции. В дальнейшем целесообразно уточнить физиологические и молекулярные механизмы синергизма холодогового и микроволнового факторов, а также адаптировать технологию для других зерновых культур. Полученные данные создают основу для разработки энергосберегающих и экологически безопасных технологий предпосевной подготовки семян, способных повысить урожайность и стрессоустойчивость растений.

Вклад авторов

В. И. Пахомов: административное руководство исследовательским проектом, научное руководство.

А. В. Брагинец: разработка методологии, проведение исследования.

О. Н. Бахчевников: написание черновика рукописи, написание рукописи — рецензирование и редактирование.

Д. А. Максак: валидация результатов.

Contributions

V. I. Pakhomov: project administration, supervision.

A. V. Braginetz: methodology, investigation.

O. N. Bakhchevnikov: writing-original draft, writing-review & editing.

D. A. Maksak: validation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Carrera-Castano G., Calleja-Cabrera J., Pernas M. et al. An updated overview on the regulation of seed germination. *Plants*. 2020;9(6):703. <https://doi.org/10.3390/plants9060703>
2. Bera K., Dutta P., Sadhukhan S. Seed priming with non-ionizing physical agents: plant responses and underlying physiological mechanisms. *Plant Cell Reports*. 2022;41(1):53-73. <https://doi.org/10.1007/s00299-021-02798-y>
3. Riedo J., Yokota A., Walther B. et al. Temporal dynamics of total and bioavailable fungicide concentrations in soil and their effect upon nine soil microbial markers. *Science of the Total Environment*. 2023;878:162995. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162995>
4. Rifna E.J., Ramanan K.R., Mahendran R. Emerging technology applications for improving seed germination. *Trends in Food Science & Technology*. 2019;86:95-108. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.029>
5. Wang J., Ma H., Wang S. Application of ultrasound, microwaves, and magnetic fields techniques in the germination of cereals. *Food Science and Technology Research*. 2019;25(4):489-497. <https://doi.org/10.3136/fstr.25.489>
6. Haque N., Agrawal A., Pati A.K. A mini review on effects of microwave on seed germination. *Research Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 2023;15(1):82-86. <https://doi.org/10.52711/0975-4385.2023.00012>
7. Iuliana C., Caprita R., Giancarla V. et al. Response of barley seedlings to microwaves at 2.45 GHz. *Scientific Papers: Animal Science & Biotechnologies*. 2013;46(1):185-191.
8. Maswada H.F., Sunoj V.S.J., Prasad P.V.V. A comparative study on the effect of seed pre-sowing treatments with microwave radiation and salicylic acid in alleviating the drought-induced damage in wheat. *Journal of Plant Growth Regulation*. 2021;40:48-66. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10079-3>
9. Lazim S.K., Ramadhan M.N. Effect of microwave and UV-C radiation on some germination parameters of barley seed using mathematical models of Gompertz and logistic: Analysis study. *Basrah Journal of Agricultural Sciences*. 2020;33(2):28-41. <https://doi.org/10.37077/25200860.2020.33.2.03>
10. Talei D., Valdiani A., Maziah M. et al. Germination response of MR 219 rice variety to different exposure times and periods of 2450 MHz microwave frequency. *The Scientific World Journal*. 2013;408026. <https://doi.org/10.1155/2013/408026>
11. Erofeeva E.A. Environmental hormesis of non-specific and specific adaptive mechanisms in plants. *Science of the Total Environment*. 2022;804:150059. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150059>
12. Araújo S.S., Paparella S., Dondi D. et al. Physical methods for seed invigoration: advantages and challenges in seed technology. *Frontiers in Plant Science*. 2016;7:646. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00646>
13. Galviz Y.C., Ribeiro R.V., Souza G.M. Yes, plants do have memory. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*. 2020;32(3):195-202. <https://doi.org/10.1007/s40626-020-00181-y>
14. Пахомов В.И., Бахчевников О.Н., Брагинец А.В. и др. Влияние предпосевной обработки семян неионизирующим излучением на урожайность ярового ячменя. *Пермский аграрный вестник*. 2025;(1):70-76. https://doi.org/10.47737/2307-2873_2025_49_70
Pakhomov V.I., Bakhchevnikov O.N., Braginets A.V. et al. Effect of pre-sowing seed treatment with non-ionising radiation on spring barley yields. *Perm Agrarian Journal*. 2025;(1):70-76. (In Russ.) https://doi.org/10.47737/2307-2873_2025_49_70
15. Брагинец А.В., Бахчевников О.Н., Хоменко П.А. Влияние предпосевной обработки семян электрофизическими и химическими способами на урожайность гороха посевного. *Таврический вестник аграрной науки*. 2024;(4):8-18. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14184269>
Braginets A.V., Bakhchevnikov O.N., Khomenko P.A. Effect of electrophysical and chemical methods of pre-sowing seed treatment on *Pisum sativum* L. yield. *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*. 2024;(4):8-18. (In Russ.) <https://doi.org/10.5281/zenodo.14184269>
16. Liu H., Able A.J., Able J.A. Priming crops for the future: rewiring stress memory. *Trends in Plant Science*. 2022;27(7):699-716. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.11.015>
17. Bhattacharya A. Effect of low-temperature stress on germination, growth, and phenology of plants: A review. *Physiological Processes in Plants Under Low Temperature Stress*. 2022;1-106. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9037-2_1
18. Meng A., Wen D., Zhang C. Dynamic changes in seed germination under low-temperature stress in maize. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022;23(10):5495. <https://doi.org/10.3390/ijms23105495>

19. Yu M., Luobu Z., Zhuoga D. et al. Advances in plant response to low-temperature stress. *Plant Growth Regulation*. 2025;105(1):167-185. <https://doi.org/10.1007/s10725-024-01253-8>
20. Kidokoro S., Shinozaki K., Yamaguchi-Shinozaki K. Transcriptional regulatory network of plant cold-stress responses. *Trends in Plant Science*. 2022;27(9):922-935. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.01.008>
21. Taheri S., Brodie G., Gupta D. Fluidisation of lentil seeds during microwave drying and disinfection could prevent detrimental impacts on their chemical and biochemical characteristics. *LWT-Food Science and Technology*. 2020;129:109534. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109534>
22. Киринов А.В., Марченко Д.М., Иванисов М.М. и др. Формирование урожайности и элементов структуры сортов озимой мягкой пшеницы по предшественнику горох в условиях ФГБНУ «АНЦ «Донской». *Зерновое хозяйство России*. 2024;16(3):33-39. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2024-92-3-33-39>
Kirin A.V., Marchenko D.M., Ivanisov M.M. et al. Formation of yield structure elements of winter bread wheat varieties when sown after peas in the conditions of the FSBSI "ARC "Donskoy". *Grain Economy of Russia*. 2024;16(3):33-39. (In Russ.) <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2024-92-3-33-39>
23. Гуреев И.И. Совершенствование методики полевого опыта. *Земледелие*. 2026;(3):18-22. <https://10.24412/0044-3913-2026-3-18-22>
Gureev I.I. Improving the field study methodology. *Zemledelie*. 2026;(3):18-22. (In Russ.) <https://10.24412/0044-3913-2026-3-18-22>
24. Логвинова Е.В., Емельянова А.А., Новикова В.Т. Оценка сортов и линий озимой пшеницы в питомнике конкурсного сортоиспытания. *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2019;(3):60-64.
Logvinova E.V., Emelyanova A.A., Novikova V.T. Evaluation of winter wheat varieties and lines in the nursery of competitive variety testing. *Bulletin of the Kursk State Agrarian University*. 2019;(3):60-64. (In Russ.)
25. Берестов И.И. К вопросу определения достоверности различий средних за ряд лет показателей краткосрочных полевых опытов. *Земледелие и растениеводство*. 2022;(6):16-20.
Berestov I.I. To the question of determining the reliability of short-term field experiments average differences indicators for a number of years. *Crop Farming and Plant Growing*. 2022;(6):16-20. (In Russ.)
26. Короневский В.И. К методике статистической обработки данных многолетних полевых опытов. *Земледелие*. 1985;(11):56-57.
Koronevskij V.I. To a technique of statistical data processing of long field experiments. *Agriculture*. 1985;(11):56-57. (In Russ.)

Сведения об авторах

Пахомов Виктор Иванович —

доктор технических наук, член-корреспондент РАН,
директор, Аграрный научный центр «Донской»,
Зерноград, Россия

<https://orcid.org/0000-0002-8715-0655>

SPIN-код: 5815-4913

vniizk30@mail.ru

Брагинец Андрей Валерьевич —

кандидат технических наук, научный сотрудник,
Аграрный научный центр «Донской», Зерноград,
Россия

<https://orcid.org/0000-0002-7188-4179>

SPIN-код: 6352-1932

Al.55552015@yandex.ru

About the authors

Viktor I. Pakhomov —

Dr. Sci. (Tech.), Corresponding member of RAS, Director,
Agricultural Research Centre Donskoy, Zernograd,
Russia

<https://orcid.org/0000-0002-8715-0655>

vniizk30@mail.ru

Andrey V. Braginetz —

Cand. Sci. (Tech.), Researcher, Agricultural Research
Centre Donskoy, Zernograd, Russia

<https://orcid.org/0000-0002-7188-4179>

Al.55552015@yandex.ru

Бахчевников Олег Николаевич —

кандидат технических наук, старший научный
сотрудник, Аграрный научный центр «Донской»,
Зерноград, Россия

<https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>

SPIN-код: 3350-9055

oleg-b@list.ru

Максак Дмитрий Андреевич —

аспирант, Аграрный научный центр «Донской»,
Зерноград, Россия

<https://orcid.org/0009-0001-0056-8857>

SPIN-код: 7236-3097

maksak.1998@mail.ru

Oleg N. Bakhchevnikov —

Cand. Sci. (Tech.), Senior Researcher,
Agricultural Research Centre Donskoy,
Zernograd, Russia

<https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>

oleg-b@list.ru

Dmiriy A. Maksak —

Postgraduate, Agricultural Research Centre Donskoy,
Zernograd, Russia

<https://orcid.org/0009-0001-0056-8857>

maksak.1998@mail.ru