

Прогностические исследования применения нетепловых воздействий для компенсации стрессовых изменений физиологических свойств зерна пшеницы (*Triticum aestivum* L.)

И. Ю. Потороко[✉], А. А. Руськина¹, А. В. Малинин¹, Д. А. Ал-Джумайли¹, О. П. Неверова²

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

✉ E-mail: irina_potoroko@mail.ru

Аннотация. Последствия глобального потепления для сельскохозяйственных культур во всем мире влияют не только на продовольственную безопасность, снижая урожайность и, следовательно, доступность сырья и продовольствия, но и на биобезопасность продуктов питания и кормов. Что касается биобезопасности пищевых продуктов, одним из наиболее важных рисков, затронутых изменением климата, стало загрязнение микотоксинами, особенно важных зерновых культур. Данные продуценты являются вторичными метаболитами, производимыми мицелиальными грибами, вредными как для человека, так и для животных. Наиболее опасные токсигенные виды относятся к родам *Fusarium*, *Aspergillus* и *Penicillium*. Виды грибов *Fusarium* заражают сельскохозяйственные культуры непосредственно в поле, в то время как виды *Aspergillus* и *Penicillium* обычно растут на зерновых и других культурах при ненадлежащих условиях сушки и хранения. Почти все микотоксины, присутствующие в пищевых продуктах и кормах, чувствительны к абиотическим факторам, поэтому изменения температуры и влажности влекут за собой повышенный риск заражения зерновых культур токсигенными грибами и их вторичными метаболитами. **Целью** данной работы стало прогностическое исследование влияния нетепловых воздействий атмосферной холодной плазмы (АХП) для компенсации влияния стресс-факторов на показатели биобезопасности мягкой яровой пшеницы в части сохранения ее физиологических свойств. В исследованиях использовался метод Ground state Hartree-Fock (HF) с применением базисного набора 3-21G/RB3LYP для моделирования на основе квантово-химических расчетов рисков формирования маскированных форм вторичных метаболитов токсигенных микромицетов в конструкции белково-углеводного комплекса эндосперма зерна пшеницы. **Научная новизна** полученных данных обусловлена доказанной эффективностью применения холодной плазмы для обеспечения биобезопасности зернового сырья в корреляции с улучшением посевных свойств. В **результате** применения нетепловых методов воздействия на основе атмосферной холодной плазмы возможно стимулирование ростовых процессов зерна с учетом исходных данных его качества.

Ключевые слова: зерно пшеницы продовольственное, зерно пшеницы фуражное, посевные свойства, холодная плазма, всхожесть, энергия прорастания, биобезопасность

Благодарности. Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) в рамках проекта 24-16-20028.

Для цитирования: Потороко И. Ю., Руськина А. А., Малинин А. В., Ал-Джумайли Д. А., Неверова О. П. Прогностические исследования применения нетепловых воздействий в компенсации стрессовых изменений физиологических свойств зерна пшеницы (*Triticum aestivum* L.) // Аграрный вестник Урала. 2025. Т. 25, № 07. С. 1095–1105. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2025-25-07-1095-1105>.

Дата поступления статьи: 05.04.2025, **дата рецензирования:** 09.06.2025, **дата принятия:** 10.05.2025.

Prognostic studies of the use of non-thermal effects to compensate for stress changes in the physiological properties of wheat grain (*Triticum aestivum* L.)

I. Yu. Potoroko¹✉, A. A. Ruskina¹, A. V. Malinin¹, D. Abdullah Al-Jumaily¹, O. P. Neverova²

¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

²Ural State Agrarian University, Ekaterinburg, Russia

✉E-mail: irina_potoroko@mail.ru

Abstract. The effects of global warming on crops around the world affect not only food security, reducing yields and, consequently, the availability of raw materials and food, but also the biosafety of food and feed. Regarding food biosafety, one of the most important risks affected by climate change has been mycotoxin contamination, especially of important grain crops. These producers are secondary metabolites produced by mycelial fungi, harmful to both humans and animals. The most dangerous toxigenic species belong to the genera *Fusarium*, *Aspergillus* and *Penicillium*. *Fusarium* fungi infect crops directly in the field, while *Aspergillus* and *Penicillium* species usually grow on cereals and other crops under improper drying and storage conditions. Almost all mycotoxins present in food and feed are sensitive to abiotic factors, therefore, changes in temperature and humidity entail an increased risk of contamination of grain crops with toxigenic fungi and their secondary metabolites. **The purpose** of this study was a predictive study of the influence of non-thermal effects of atmospheric cold plasma (AHP) to compensate for the influence of stress factors on the biosafety of soft spring wheat in terms of preserving its physiological properties. **Methods.** The research used the Ground state Hartree-Fock (HF) method using the 3-21G/RB3LYP basis set for modeling based on quantum-chemical calculations of assessing the risks of forming masked forms of secondary metabolites of toxigenic micromycetes in the structure of the protein-carbohydrate complex of the endosperm of wheat grain. **The scientific novelty** of the data obtained is due to the proven effectiveness of using cold plasma to ensure the biosafety of grain raw materials in correlation with improved sowing properties. As a **result** of using non-thermal methods of action based on atmospheric cold plasma, it is possible to stimulate growth processes taking into account the initial data of its quality.

Keywords: food wheat grain, feed wheat grain, sowing properties, cold plasma, germination, germination energy, biosafety

Acknowledgements. The research was carried out with the financial support of a grant from the Russian Science Foundation (RSF) as part of the 24-16-20028 project.

For citation: Potoroko I. Yu., Ruskina A. A., Malinin A. V., Al- Jumaily D. A., Neverova O. P. Prognostic studies of the use of non-thermal effects in compensation of stress changes in the physiological properties of wheat grain (*Triticum aestivum* L.). *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2025; 25 (07): 1095–1105. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2025-25-07-1095-1105>. (In Russ.)

Date of paper submission: 05.04.2025, **date of review:** 09.06.2025, **date of acceptance:** 10.05.2025.

Постановка проблемы (Introduction)

Последствия глобального изменения климата определяют прогнозируемые для сельскохозяйственных культур стрессовые состояния, нарушающие физиологические процессы формирования зерновой массы за счет способности адекватно реагировать на неблагоприятные условия. Вместе с тем возможно нарушение согласованности между физиологическими функциями за счет глубоких изменений в биологическом объекте обмена веществ, которое может выражаться в изменениях физиологических характеристик. Считается, что именно изменения температуры и количество осадков влекут за

собой повышенный риск заражения зерновых культур токсигенными грибами и их метаболитами [7].

Сельское хозяйство и в целом АПК в значительной степени зависит от изменчивости климата и экстремальных погодных явлений. Изменения климата и риски возникновения стрессовых абиотических факторов оказывают сильное влияние на качество сельскохозяйственных культур, определяют объемы производства сырья и, как следствие, доступность продовольствия и биобезопасность продуктов его переработки.

Что касается обеспечения биобезопасности пищевых систем, полученных из зернового сырья,

подверженного воздействию стресс-факторов в условиях экстремальных погодных условий (ЭПУ), присутствие микотоксинов (МТ), вторичных метаболитов токсигенных плесеней, определяет высокие риски на всех этапах товарной логистики [6]. Наиболее токсигенными являются МТ, продуцируемые видами *Fusarium*, *Aspergillus* и *Penicillium*, которые проявляют огромную физиологическую адаптивность и, таким образом, колонизируют широкий спектр биологических объектов, в том числе зерновые культуры [10; 13]. Фактически злаки являются основным источником загрязнения микотоксинами в трофической цепочке, поэтому требуется жесткий контроль количества в аспекте прослеживаемости их миграции, а также рисков их маскирования в системе зерна [4].

Есть теории, что изменение климата ведет к появлению новых, более вирулентных штаммов патогенов. При этом пшеница особенно восприимчива к грибковым заболеваниям, таким как ржавчина, мучнистая роса, фузариоз колоса (ФНВ) и фузариозная корончатая гниль (FCR), которые вызываются заражением комплекса видов *Fusarium graminearum* (FGSC), включая *Fusarium graminearum*, *Fusarium asiaticum*, *Fusarium culmorum* и *Fusarium avenaceum*. Изучение природы МТ, регламентирование их содержания в сырье и продуктах переработки, предназначенных для потребления человеком, а именно афлатоксинов (AFB₁, B₂, G₁, G₂, M₁), охратоксина А (ОТА), трихотеценов (дезоксиниваленола (DON), диацетоксисцирпенола, токсинов НТ-2 и Т-2), зеараленона (ZEN) и фумонизинов (FB₁, B₃), безусловно, позволит минимизировать опасность [16; 18].

Среди основных сельскохозяйственных культур, находящихся под высокой угрозой влияния стресс-факторов глобального изменения климата, выделяется пшеница (*Triticum aestivum*) [9]. Относительно большой вегетационный период, необходимый для ее культивирования, увеличивает вероятность влияния абиотических факторов: более 90 % регионов выращивания пшеницы подвергаются по крайней мере одному из сочетаний факторов засуха/жара, осадки/жара за сезон, которые могут влиять на урожай и качественные показатели пшеницы. В условиях глобального изменения климата, по мнению экспертов, к 2050 году более 50 % пахотных земель во всем мире будут засолены, что создаст большие риски для глобальной продовольственной безопасности [1; 5].

Однако некоторые традиционные методы и подходы (основанные на применении химической обработки) не оправдывают ожиданий производителей из-за таких ограничений, как безопасность, эффективность и нарушение характеристик качества пищевых продуктов. С разной степенью успеха были опробованы как фумигация оксидом этилена, так и термическая стерилизация. Однако эти методы име-

ют ряд недостатков при применении для стерилизации зерна: например, остаются токсичные остатки, изменяются органолептические свойства. По этим причинам крайне желательно сокращение патогенной микрофлоры альтернативными способами, и нетепловые методы могут быть выбраны, особенно потому, что в отличие от термической дезактивации они не разрушают питательные вещества. Данные подходы имеют различную эффективность удаления или снижения микотоксинов в зависимости от условий обработки, типа микотоксина и пищевой матрицы [8].

Для обеспечения пищевой промышленности и животноводческой отрасли безопасными сырьевыми ингредиентами и конечными продуктами их переработки необходимы новые подходы минимизации возможных рисков для агропромышленного комплекса (АПК) в рамках обеспечения продовольственной безопасности и суверенитета страны, достижения технологического лидерства в отрасли.

Целью данной работы стало прогностическое исследование влияния нетепловых воздействий атмосферной холодной плазмы (АХП) для компенсации влияния стресс-факторов на показатели биобезопасности мягкой яровой пшеницы в части сохранения ее физиологических свойств.

Методология и методы исследования (Methods)

Прогностические исследования осуществлялись с использованием моделирования на основе квантово-химических расчетов для прогнозирования их стабильности взаимодействий МТ (дезоксиниваленол (ДОН), зеараленон (ЗЕН)) с клейковинным протеином (глиадином) зерна пшеницы. В исследованиях использовался метод Ground state Hartree-Fock (HF) с применением базисного набора 3-21G/RB3LYP. Метод Хартри – Фока (Ground state Hartree – Fock) – приближенный метод решения уравнения Шредингера, позволяющий определить волновую функцию и энергию квантовой многочастичной системы в стационарном состоянии. Исходные данные о микотоксинах и протеине зерна пшеницы для квантово-химических расчетов были получены при помощи баз данных PubChem и Protein Data Bank (PDB) [2].

Объектами исследования были партии зерна яровой мягкой пшеницы продовольственного назначения урожая 2024 года, из которых были сформированы пробы для исследований возможности применения нетепловых методов воздействия с целью регуляции посевных свойств.

Для оценки влияния нетепловых методов воздействия на компенсацию физиологических свойств (реакция на прорастание) использовали следующую методологию: применяли для обработки проб зерна атмосферную холодную плазму (АХП) и закладывали на прорастание с соблюдением условий ГОСТ.

Для достижения поставленной цели образцы зерновой массы подвергали воздействию атмосферной холодной плазмы (АХП). Поток холодной плазмы генерируется за счет отрицательного коронного разряда между анодом и катодом при импульсном напряжении со следующими параметрами: разность потенциалов – 10 кВ, частота – 50 Гц, плазмообразующее вещество – воздух. Зерновую массу размещают толщиной слоя 5 мм на поверхности, являющейся анодом, и обрабатывают в режимах: 3; 5 и 10 минут [3].

Для выявления оптимальных режимов воздействия холодной плазмы у образцов зерна пшеницы оценивались такие показатели качества, как всхожесть (по ГОСТ 12038-84 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести»), энергия прорастания (по ГОСТ 10968-88 «Зерно. Методы определения энергии прорастания и способности прорастания»), а также была проведена сравнительная оценка биометрических па-

раметров вегетативных органов растения (длина стебля и корня). В ходе исследований определяли жизнеспособность семян, массу надземной части и объем корней, осуществляли учет всходов и динамику развития проростков. Массив полученных данных математически обрабатывался программой Statistica for Windows.

Результаты (Results)

Для установления подверженности проблемам глобального изменения климата территорий Урала, в частности Челябинской области, был проведен анализ открытых метаданных климатических изменений на платформе ВНИИГМИ-МЦД в динамике периода с 1990 по 2020 годы. Обработка данных для обозначенных территорий реализована в программном пакете MatLab, что позволило осуществить зональное климатическое картографирование территорий в обозначенном временном периоде (рис. 1) [5].

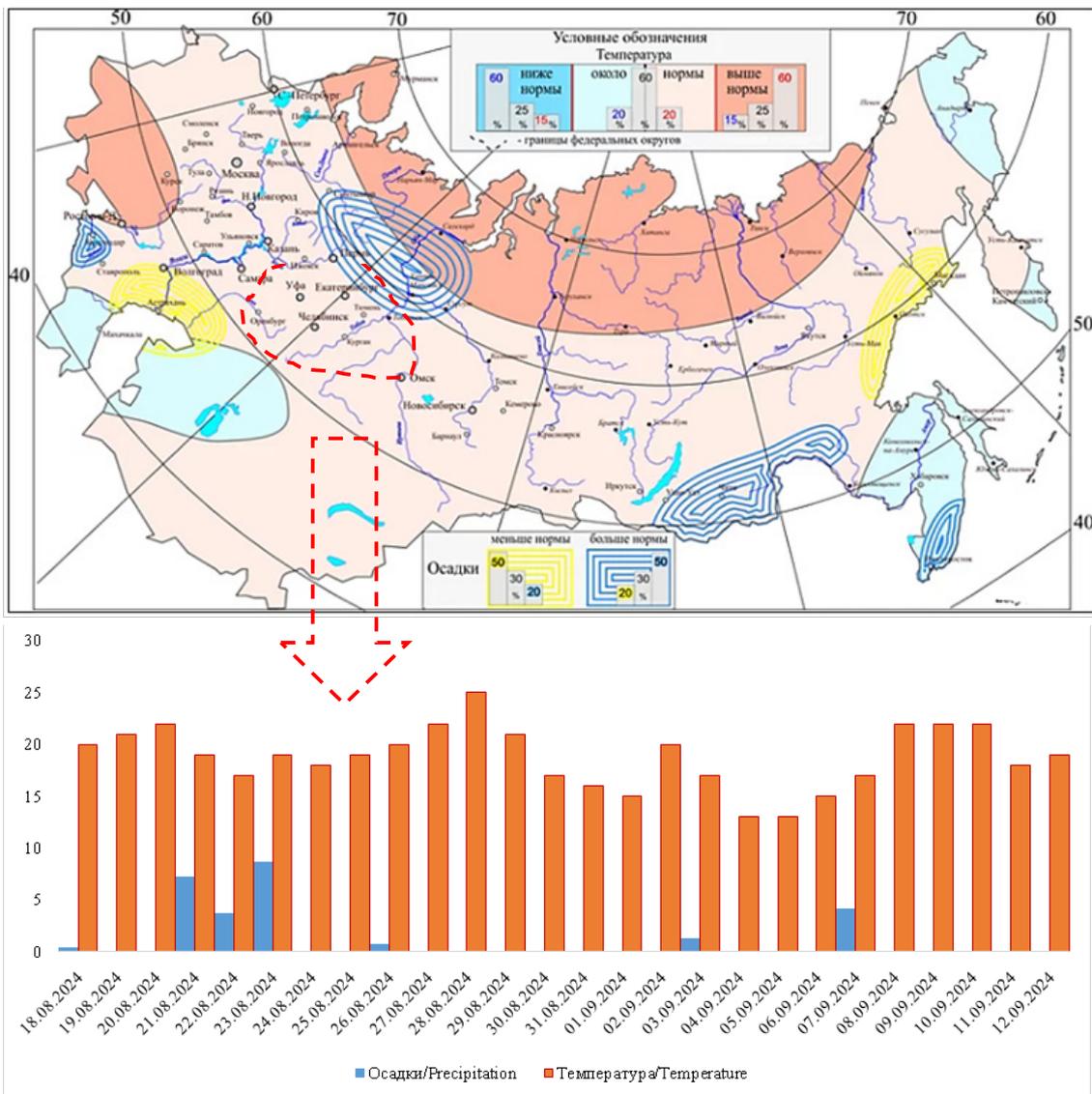


Рис. 1. Распределение осадков и температуры в период август – сентябрь (уборка зерновых) в 2024 году
 Fig. 1. Distribution of precipitation and temperature in the period August – September (grain harvest) in 2024

Таблица 1
Локализация молекулярных орбиталей HOMO и LUMO между МТ
и глиадином зерна пшеницы

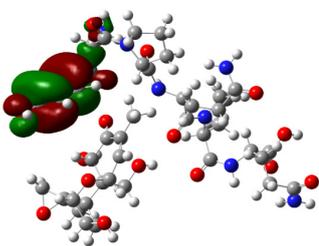
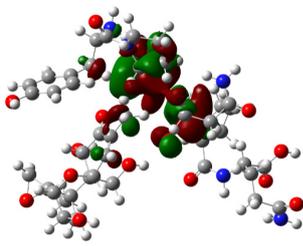
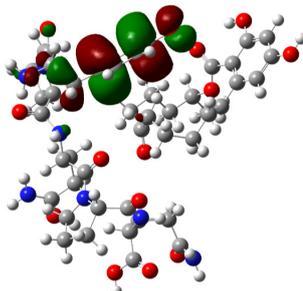
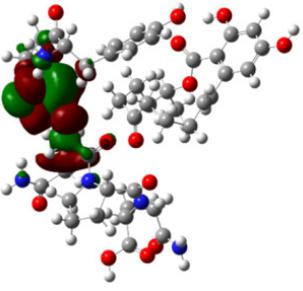
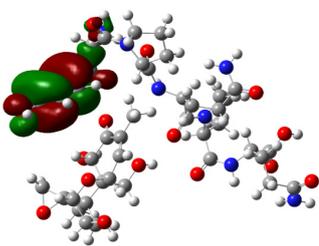
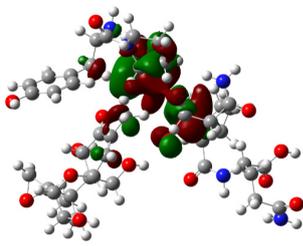
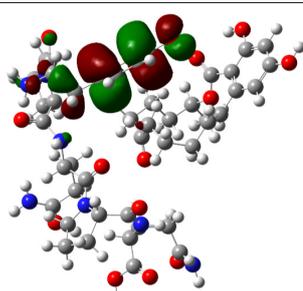
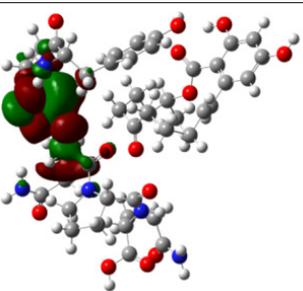
Объект	Молекулярные орбитали	
	HOMO	LUMO
Глиадин/ ДОН		
Глиадин/ ЗЕН		

Table 1
Localization of HOMO and LUMO molecular orbitals between MT and gliadin of wheat grain

Object	Molecular orbitals	
	HOMO	LUMO
Gliadin/ DON		
Gliadin/ ZEN		

Определение закономерностей протекания климатических явлений за 30-летний период наблюдений показало усиление влияния процессов глобального потепления на агроклиматическое состояние территорий Урала. Среднегодовая температура воздуха возросла на 1,32 °С, укоренение темпов роста температуры воздуха происходило на фоне постепенного снижения среднегодового количества осадков со сдвигом в сторону увеличения осадков в лет-

ний период (июль – август). По данным областных гидрометеоцентров периода 2024 года, территории были подвержены опасным циклоническим явлениям, которые проявлялись в обильных осадках в период уборки урожая зерновых культур. Проявление ЭПУ определяет необходимость прослеживания направлений движения атмосферных масс для корректировки агротехнологических приемов с целью сохранения физиологических характеристик.

На следующем этапе исследований осуществлена при условии присутствия токсигенных микромицетов прогностическая оценка рисков формирования маскированных форм их вторичных метаболитов в конструкции белково-углеводного комплекса эндосперма зерна пшеницы. Анализ молекулярных орбиталей НОМО и LUMO микотоксинов в контексте присутствия зерна пшеницы наблюдаются как связывающие орбитали, которые имеют энергию ниже энергии исходной атомной орбитали, так и разрыхляющие орбитали, которые имеют энергию выше исходной атомной орбитали. Далее оценивался размер энергетического зазора (НОМО-LUMO gap) для всех составляющих компонентов по отдельности: у афлатоксина В1 она равен 0,159 эВ, у ДОН – 0,188 эВ, у зеараленона – 0,166 эВ, у Т-2-токсина – 0,223 эВ, у глиадина – 0,214 эВ. Наибольшее значение НОМО-LUMO gap наблюдается у Т-2-токсина и составляет 0,223 эВ. Таким образом, Т-2-токсин обладает более высокой кинетической стабильностью молекулы и низкой химической реактивностью, так как для возбуждения электрона с НОМО на LUMO требуется больше энергии. Стоит отметить, что наименьший НОМО-LUMO gap часто коррелирует с повышенной реактивностью, так как для возбуждения требуется меньше энергии [12].

Прогностические исследования белок-лигандного комплекса зерна пшеницы и микотоксинов дезоксиниваленола (ДОН) и зеараленона (ЗЕН) с применением квантово-химических расчетов по локализации молекулярных орбиталей НОМО и LUMO представлены ниже в таблице.

Оценка показателя размера энергетического зазора (НОМО-LUMO gap) белково-лигандного комплекса для эффективности взаимодействия: глиадина/ ДОН составляет 0,192 эВ, глиадина/ ZEN составляет 0,202 эВ. Таким образом, сила взаимодействия доноров и акцепторов, скорость циклоприсоединения обратно пропорциональны разнице в энергии между взаимодействующими НОМО и LUMO. Если зазор небольшой, то взаимодействие сильное, реакция быстрая, что определяет риски формирования скрытых форм в МТ в клейковинном комплексе эндосперма зерна и, как следствие, переход в продукты переработки.

Таблица 2

Качественные показатели пшеницы мягкой яровой продовольственного назначения

Наименование показателей	Пшеница продовольственная
Влажность, %	12,4
Стекловидность, %	88,8
Натура, г/л	731
Масса 1000 зерен, г	36,6
Количество клейковины, %	28,4
Качество клейковины, ед. ИДК	56,5
Число падения, с	423

Зерно урожая 2024 года по общей токсичности на уровне приемлемых значений, методом MALDI TOF определено количество плесневых грибов в выборке зерна на уровне от $1,6 \times 10^3$ до $2,3 \times 10^5$ КОЕ/г. Идентифицированы виды *Alternaria alternata* (скоп 2.312), *Fusarium spp.* (скоп 1.959), *Penicillium camemberti* (скоп 2.265), *Aspergillus flavus* (скоп 1.918), *Aspergillus glaucus* (скоп 1.827) *Aspergillus parasiticus* (скоп 2.054) и *Didumella glomerata* (скоп 1,773), *Sarocladium strictum* (скоп 1,988).

Оценка исходного качества зерновых масс (таблица 2) показала вариативность по основным показателям качества и технологической пригодности в переработку.

Обеззараживание зерновой массы с использованием АХП обеспечивается при совместном воздействии импульсного электрического поля и холодной плазмы при следующих параметрах: разность потенциалов 8–15 кВт, частота 100 Гц, длительность импульса 1–100 мс. Зерновую массу размещали на движущееся полотно установки слоем не более 5 мм, скорость движения на потоковой ленте обеспечивала необходимую длительность нахождения его в камере плазменного поля при температуре на уровне 30–40 °С для сохранения физиологических и биохимических свойств зерновой массы. АХП-воздействие осуществляли при разных режимах длительности обработки: 3; 5; 10 минут, эффективность воздействия оценивали по показателю общей токсичности до и после обеззараживания.

В совокупности микробиологических показателей установлено снижение КМАФАнМ, КОЕ/г средних значений в 10–20 раз; количество плесневых грибов в зерне после ХП-обеззараживания значительно снизилось, в том числе в пробах зерна с высокими исходными характеристиками, до уровня регламентируемого значения (согласно ГОСТ не менее 90 КОЕ/г), что свидетельствует об эффективности используемой обеззараживающей технологии на основе холодной плазмы. Для каждого вида токсигенных микромицетов с учетом уровня обсемененности зерновых масс необходим регламент ведения процессов холодноплазменного обеззараживания.

Table 2

Qualitative indicators of soft spring wheat for food purposes

Name of indicators	Food wheat
Humidity, %	12.4
Vitreousness, %	88.8
Nature, g/l	731
Weight of 1000 grains, g	36.6
Amount of gluten, %	28.4
Gluten quality, un. GSG	56.5
Falling number, s	423

Таблица 3

Результаты влияния холодной плазмы на прорастание зерна пшеницы мягкой яровой продовольственной

Наименование образца	Всхожесть, %	Энергия прорастания, %	Визуализация биометрических параметров
Пшеница мягкая яровая, контроль	87,3 ± 0,5	83,4 ± 0,5	
Пшеница мягкая яровая, ХП 3 минуты	91,3 ± 0,5	86,3 ± 0,5	
Пшеница мягкая яровая, ХП 5 минут	98,0 ± 0,6	96,5 ± 0,6	
Пшеница мягкая яровая, ХП 10 минут	91,2 ± 0,6	87,7 ± 0,5	

Table 3

Results of the effect of cold plasma on the germination of soft spring food wheat grain

Sample name	Germination, %	Germination energy, %	Visualization of biometric parameters
<i>Soft spring wheat, control</i>	87.3 ± 0.5	83.4 ± 0.5	
<i>Soft spring wheat, cold plasma 3 minutes</i>	91.3 ± 0.5	86.3 ± 0.5	
<i>Soft spring wheat, cold plasma 5 minutes</i>	98.0 ± 0.6	96.5 ± 0.6	
<i>Soft spring wheat, cold plasma 10 minutes</i>	91.2 ± 0.6	87.7 ± 0.5	

Для оценки влияния АХП на физиологические свойства зерна пшеницы с целью исключения снижения активности точек роста проводили исследование по показателям всхожести, скорости прорастания, поглощения воды, биометрические показатели побега. Стоит отметить, что во время обработки плазма воздействует на поверхность зерна, создавая электромагнитное поле, которое запускает цепочку реакций. Результаты исследования прорастания зерна пшеницы мягкой яровой разных сортов при разной длительности воздействия АХП (от 3 до 10 минут) представлены в таблице 3.

Исходя из представленных результатов исследования, наилучший эффект ХП наблюдается при 5 минутах для мягкой яровой пшеницы продовольственного назначения, всхожесть которой составила 98,0 % при энергии прорастания 96,5 %. Воздействие холодной плазмой визуально не изменяет поверхностных свойств зернового сырья, однако фиксируется улучшение водопоглощения и прорастания. В параллели исследований наблюдается эффект обеззараживания за счет того, что высокореактивные компоненты холодной плазмы дезактивируют и фактически уменьшают количество микроорганизмов на поверхности зерна [10; 13; 17].

Оценка биометрических параметров вегетативных органов зерна яровой мягкой пшеницы (длина стебля и корня) при разных режимах воздействия холодной плазмы (3 минуты; 5 минут; 10 минут). Результаты динамики процесса представлены на рис. 2, а визуализация биометрических параметров вегетативных органов зерна пшеницы после воз-

действия ХП – в таблице 3. Результаты исследования показали, что у сортов мягкой яровой пшеницы продовольственного назначения в процессе обработки при разных режимах ХП длина побегов и корневой системы изменялась.

Вариативность длительности обработки ХП зерна пшеницы оказывает эффект по-разному. Для мягкой яровой пшеницы продовольственного назначения было выявлено, что наилучший эффект обработки АХП – в течение 5 минут. Длина побегов была в диапазоне $(20,0 \pm 0,5)$ см, в то время как прирост побегов составил $(0,8 \pm 0,2)$ см. Рост корневой системы находился в диапазоне $(8,4 \pm 0,3)$ см, в то время как прирост длины корня составил $(1,4 \pm 0,4)$ см. Обработка в течение 5 минут также показала наилучший эффект для мягкой яровой пшеницы фуражного назначения. Длина побегов была в диапазоне $(18,2 \pm 0,4)$ см, в то время как прирост побегов составил $(0,6 \pm 0,1)$ см. Рост корневой системы находился в диапазоне $(7,8 \pm 0,2)$ см, в то время как прирост длины корня составил $(0,2 \pm 0,1)$ см.

Холодная плазма представляет собой ионизированный газ, содержащий активные формы кислорода, азота и других веществ, которые в совокупности проявляют обеззараживающий эффект. Стоит отметить, что большинство растений не может самостоятельно фиксировать азот, который превращается в аммиак и становится удобрением для посевов. За фиксацию отвечают специальные бактерии, которые встречаются достаточно редко. Обработка плазмой делает азот биологически доступным для растений [11; 14; 15].

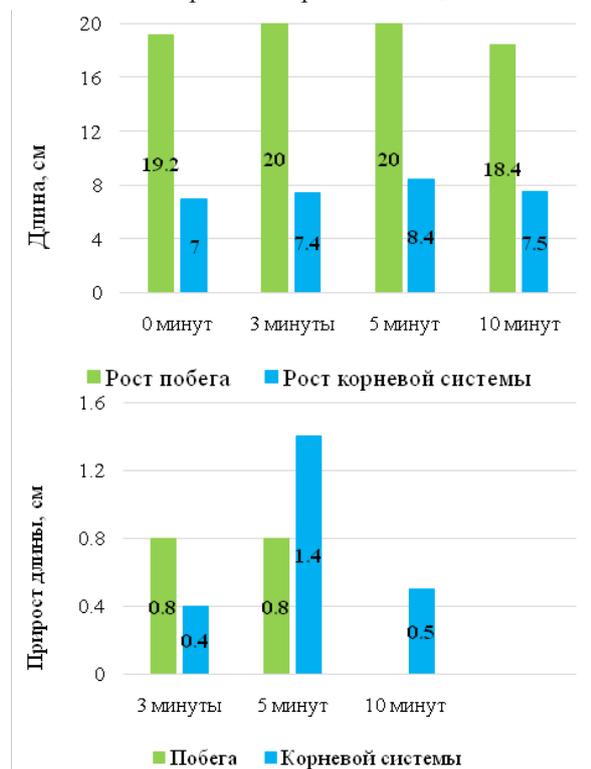


Рис. 2. Результаты воздействия АХП на зерно пшеницы продовольственное

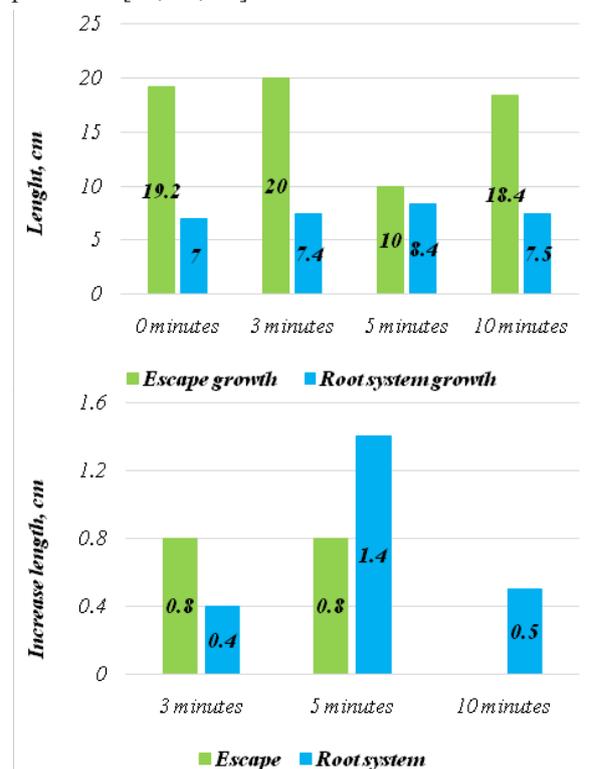


Fig. 2. The results of the impact of AHP on wheat grain food

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Результаты исследования доказывают эффективность применения нетепловых воздействий атмосферной холодной плазмы, используемой для обеспечения биобезопасности зерновой массы мягкой яровой пшеницы продовольственного назначения на сохранение ее посевных свойств. В ходе исследования всхожести и энергии прорастания, а также биометрических параметров вегетативных органов у мягкой яровой пшеницы продовольственного и фуражного назначения был выявлен наилучший эффект при обработке ХП в течение 5 минут.

В процессе обработки зерна пшеницы при разных режимах ХП длина побегов и корневой си-

стемы изменялась. Вариативность длительности обработки ХП зерна пшеницы оказывает эффект по-разному. При глобальном изменении климата применение эффектов холодной плазмы позволит улучшить посевные свойства зерновых культур и обеспечить их биобезопасность. Таким образом, применение нетепловых методов воздействия на основе атмосферной холодной плазмы возможно использовать в качестве активатора для стимулирования ростовых процессов, причем для каждого сорта зерна пшеницы с учетом исходных данных его качества необходимо определять оптимальные режимы.

Библиографический список

1. Демиденко Г. А., Жирнова Д. Ф. Рост и развитие яровой пшеницы при различном режиме увлажнения почвы в вегетационном опыте // Вестник КрасГАУ. 2013. № 11. С. 106–112.
2. Игнатов С. К. Квантово-химическое моделирование атомно-молекулярных процессов: учебное пособие. Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, 2019. 79 с.
3. Патент № 2707944 Российская Федерация, А21D 8/02(2006.01). Способ обеззараживания зерна / И. Ю. Потороко, Н. В. Науменко, А. Я. Лейви, И. В. Калинина. № 2019124649; заявл. 31.07.2019; опубл. 02.12.2019. 10 с.
4. Потороко И. Ю., Малинин А. В., Кади А. М. Я., Аңйум В., Неверова О. П. Стратегические ориентиры обеспечения биобезопасности зерновых в экстремальных условиях изменения климата // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24, № 10. С. 1334–1344. DOI: 10.32417/1997-4868-2024-24-10-1334-1344.
5. Руськина А. А., Потороко И. Ю. Влияние экстремальных погодных условий на качественные характеристики яровой мягкой пшеницы районированных сортов // Современные материалы и методы решения экологических проблем постиндустриальной агломерации: сборник материалов II всероссийской научно-практической конференции. Челябинск, 2025. С. 108–112.
6. Степных Н. В., Нестерова Е. В., Заргарян А. М. Эффективность производства зерна в условиях изменения климата в Зауралье // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24, № 07. С. 944–956. DOI: 10.32417/1997-4868-2024-24-06-944-956.
7. Agwupuye J. A., Neji P. A., Hitler L., Odey J. O., Unimuke T. O., Bisong E. A., Eno E. A., Utsu P. M., Ntui T. N Investigation on electronic structure, vibrational spectra, NBO analysis, and molecular docking studies of aflatoxins and selected emerging mycotoxins against wild-type androgen receptor // Heliyon. 2021. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e07544.
8. Angel M., Jesús M. G.-J., María J. S., Impact of global warming on mycotoxins // Current Opinion in Food Science. 2017. Vol. 18. Pp. 76–81. DOI: 10.1016/j.cofs.2017.11.009.
9. Cho K. J., Kang J. S., Cho W. T., Lee C. H., Ha J. K., Song K. B. Decomposition of zearalenone in vitro by *Bacillus subtilis* // Biotechnology Letters. 2010. Vol. 32 (12). Pp. 1921–1924. DOI: 10.1007/s10529-010-0373-y.
10. Collins C. O., Gideon D. A., Okechukwu G. I., Abiodun A. O. Climate-Smart Agriculture Amidst Climate Change to Enhance Agricultural Production: A Bibliometric Analysis // Land, MDPI. 2022. Vol. 12 (1).. DOI: 10.3390/land12010050.
11. Goudarzi S., Ghafoorifard H., Ghasemi S., Mazandarani A. The effect of atmospheric cold plasma on the rates of germination and root length and shoot length of sesame seed // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2020. Pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.ifset.2020.102529.
12. Guragain R. P., Kierzkowska-Pawlak H., Fronczak M., Kędzierska-Sar A., Subedi D. P., Tyczkowski J. Germination improvement of fenugreek seeds with cold plasma: exploring long-lasting effects of surface modification // Scientia Horticulturae. 2024. Vol. 324. Article number: 112619. DOI: 10.1016/j.scienta.2023.112619.
13. Ling L., Jiafeng J., Jiangang L., Minchong S., Xin H., Hanliang S., Yuanhua D. Effects of cold plasma treatment on seed germination and seedling growth of soybean // Scientific reports. 2014. Vol. 4(1). Article number: 5859. DOI: 10.1038/srep05859.
14. Pizá M.C.P., Prevosto L., Zilli C., Cejas E., Kelly H., Balestrasse K. Effects of non-thermal plasmas on seed-borne *Diaporthe/Phomopsis* complex and germination parameters of soybean seeds // Innovative food Science and Emerging Technologies. 2018. Vol. 49. Pp. 82–91. DOI: 10.1016/j.ifset.2018.07.009.

15. Rasooli Z., Barzin G., Mahabadi T. D., Entezari M. Stimulating effects of cold plasma seed priming on germination and seedling growth of cumin plant // *South African Journal of Botany*. 2021. Vol. 142 (10). Pp. 106–113. DOI: 10.1016/j.sajb.2021.06.025.

16. Shabir A. M., Dar B. N., Shah M. A., Sofi S. A., Hamdani A. M., Oliveira C. A. F., Moosavi M. H., Khaneghah A. M., Sant'Ana A. S. Application of new technologies in decontamination of mycotoxins in cereal grains: challenges, and perspectives // *Food and Chemical Toxicology*. 2021. Vol. 148. DOI: 10.1016/j.fct.2021.111976.

17. Ucar Y., Ceylan Z., Durmus M., Tomar O., Cetinkaya T. Application of cold plasma technology in the food industry and its combination with other emerging technologies // *Trends in Food Science & Technology*. 2021. Vol. 114 (98). Pp. 355–371. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.06.004.

18. Voloshchuk O., Voloshchuk I., Hlyva V., and Kovalchuk O. Enzymic mycosis exhaustion of grain as one of the reasons for decreasing the seed quality of the triticale of winter in the zone of the western forest-steppe of Ukraine // *Balanced Nature Using*. 2018. Vol. 7 (1). Pp. 55–61. DOI: 10.33730/2310-4678.1.2018.276474.

Об авторах:

Ирина Юрьевна Потороко, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия;

ORCID 0000-0002-3059-8061, AuthorID 646677. *E-mail: irina_potoroko@mail.ru*

Алена Александровна Руськина, кандидат технических наук, доцент кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет Челябинск, Россия; ORCID 0000-0002-2451-9339, AuthorID 846327. *E-mail: ruskina_a@mail.ru*

Артем Владимирович Малинин, аспирант кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; ORCID 0000-0001-9270-5945, AuthorID 1031401.

E-mail: malininav@susu.ru

Абдуллах Далаф Ал-Джумайли, аспирант кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; ORCID 0009-0006-1151-747x.

E-mail: Dalafalgumaily9@gmail.com

Ольга Петровна Неверова, кандидат биологических наук, доцент, ORCID 0000-0002-2474-2290, AuthorID 393632. *E-mail: opneverova@mail.ru*

References

1. Demidenko G. A., Zhirnova D. F. Growth and development of spring wheat under different soil moisture conditions in the vegetation experiment. *Bulletin of KrasGAU*. 2013; 11: 106–112. (In Russ.)

2. Ignatov S. K. Quantum chemical modeling of atomic and molecular processes: a textbook. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University named after N. I. Lobachevsky, 2019. 94 p. (In Russ.)

3. Patent No. 2707944 Russian Federation, A21D 8/02(2006.01). Method of disinfection of grain / I. Yu. Potoroko, N. V. Naumenko, A. Ya. Leivi, I. V. Kalinina. No. 2019124649; application dated 07/31/2019; published on 12/02/2019. 10 p. (In Russ.)

4. Potoroko I. Yu., Malinin A. V., Kadi A. M. Y., Anjum V., Neverova O. P. Strategic guidelines for ensuring biosafety of grain crops in extreme conditions of climate change. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24: 10: 1334–1344. DOI: 10.32417/1997-4868-2024-24-10-1334-1344. (In Russ.)

5. Ruskina A. A., Potoroko I. Yu. The influence of extreme weather conditions on the qualitative characteristics of spring soft wheat of zoned varieties. *Modern materials and methods for solving environmental problems of post-industrial agglomeration: proceedings of the II All-Russian scientific and practical conference*. Chelyabinsk, 2025. Pp. 108–112. (In Russ.)

6. Stepnykh N. V., Nesterova E. V., Zargaryan A. M. Grain production efficiency in the conditions of climate change in the Trans-Urals. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24: 07: 944–956. DOI: 10.32417/1997-4868-2024-24-06-944-956. (In Russ.)

7. Agwupuye J. A., Neji P. A., Hitler L., Odey J. O., Unimuke T. O., Bisiong E. A., Eno E. A., Utsu P. M., Ntui T. N. Investigation on electronic structure, vibrational spectra, NBO analysis, and molecular docking studies of aflatoxins and selected emerging mycotoxins against wild-type androgen receptor. *Heliyon*. 2021. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e07544.

8. Angel M., Jesús M. G.-J., María J. S., Impact of global warming on mycotoxins. *Current Opinion in Food Science*. 2017; 18: 76–81. DOI: 10.1016/j.cofs.2017.11.009.

9. Cho K. J., Kang J. S., Cho W. T., Lee C. H., Ha J. K., Song K. B. Decomposition of zearalenone in vitro by *Bacillus subtilis*. *Biotechnology Letters*. 2010; 32 (12): 1921–1924. DOI: 10.1007/s10529-010-0373-y.

10. Collins C. O., Gideon D. A., Okechukwu G. I., Abiodun A. O. Climate-smart agriculture amidst climate change to enhance agricultural production: a bibliometric analysis. *Land, MDPI*. 2022; 12 (1). DOI: 10.3390/land12010050.
11. Goudarzi S., Ghafoorifard H., Ghasemi S., Mazandarani A. The effect of atmospheric cold plasma on the rates of germination and root length and shoot length of sesame seed. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020. DOI: 10.1016/j.ifset.2020.102529.
12. Guragain R. P., Kierzkowska-Pawlak H., Fronczak M., Kędzierska-Sar A., Subedi D. P., Tyczkowski J. Germination improvement of fenugreek seeds with cold plasma: exploring long-lasting effects of surface modification. *Scientia Horticulturae*. 2024; 324: 112619. DOI: 10.1016/j.scienta.2023.112619.
13. Ling L., Jiafeng J., Jiangang L., Minchong S., Xin H., Hanliang S., Yuanhua D. Effects of cold plasma treatment on seed germination and seedling growth of soybean. *Scientific Reports*. 2014; 4 (1): 5859. DOI: 10.1038/srep05859.
14. Pizá M. C. P., Prevosto L., Zilli C., Cejas E., Kelly H., Balestrasse K. Effects of non-thermal plasmas on seed-borne Diaporthe/Phomopsis complex and germination parameters of soybean seeds. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2018; 49: 82–91. DOI: 10.1016/j.ifset.2018.07.009.
15. Rasooli Z., Barzin G., Mahabadi T. D., Entezari M. Stimulating effects of cold plasma seed priming on germination and seedling growth of cumin plant. *South African Journal of Botany*. 2021; 142 (10): 106–113. DOI: 10.1016/j.sajb.2021.06.025.
16. Shabir A. M., Dar B. N., Shah M. A., Sofi S. A., Hamdani A. M., Oliveira C. A. F., Moosavi M. H., Khaneghah A. M., Sant’Ana A. S. Application of new technologies in decontamination of mycotoxins in cereal grains: challenges, and perspectives. *Food and Chemical Toxicology*. 2021; 148. DOI: 10.1016/j.fct.2021.111976.
17. Ucar Y., Ceylan Z., Durmus M., Tomar O., Cetinkaya T. Application of cold plasma technology in the food industry and its combination with other emerging technologies. *Trends in Food Science & Technology*. 2021; 114 (98): 355–371. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.06.004.
18. Voloshchuk O., Voloshchuk I., Hlyva V., and Kovalchuk O. Enzymic mycosis exhaustion of grain as one of the reasons for decreasing the seed quality of the triticale of winter in the zone of the western forest-steppe of Ukraine. *Balanced Nature Using*. 2018; 7 (1): 55–61. DOI: 10.33730/2310-4678.1.2018.276474.

Authors' information:

Irina Yu. Potoroko, doctor of technical sciences, professor of the department of food technology and biotechnology, South Ural State University, Chelyabinsk; ORCID 0000-0002-3059-8061, AuthorID 646677.

E-mail: irina_potoroko@mail.ru

Alena A. Ruskina, candidate of technical sciences, associate professor of the department of food and biotechnology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; ORCID 0000-0002-2451-9339, AuthorID 846327.

E-mail: ruskina_a@mail.ru

Artem V. Malinin, postgraduate at the department of food and biotechnologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; ORCID 0000-0001-9270-5945, AuthorID 1031401. *E-mail: malininav@susu.ru*

Dalaf Abdullah Al-Jumaily, postgraduate at the department of food and biotechnologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; ORCID 0009-0006-1151-747x. *E-mail: Dalafalgumaily9@gmail.com*

Olga P. Neverova, candidate of biological sciences, associate professor, ORCID 0000-0002-2474-2290, AuthorID 393632. *E-mail: opneverova@mail.ru*